MINISTERUL ÎNVĂȚĂMÂNTULUI

C. Dalban
E. Chesaru
S. Dima
C. Serbescu

CONSTRUCȚII CU STRUCTURĂ METALICĂ

C. DALBAN
E. CHESARU
Ş. DIMA
C. ŞERBESCU

CONSTRUCŢII CU STRUCTURĂ METALICĂ

EDITURA DIDACTICĂ ŞI PEDAGOGICĂ, R.A.
BUCUREŞTI

Prefață

Lucrarea de față cuprinde elementele de bază necesare pentru alcătuirea și calculul elementelor de construcții metalice, precum și pentru alcătuirea și verificarea prin calcul a îmbinărilor și prinderilor folosite curent în construcțiile metalice.

Prezenta lucrare constituie primul volum din lucrarea „Construcții cu structuri metalice", referindu-se la aspectele legate de alcătuirea și calculul elementelor structurale.

Lucrarea este destinată pregătirii de specialitate în domeniul construcțiilor metalice, începând cu studenții de la facultățile de construcții și continuând cu doctoranzii și participanții la cursurile postuniversitare; lucrarea poate fi folosită de către inginerii constructori care lucrează în cercetare sau la proiectarea, uzinarea sau execuția construcțiilor metalice.

În perioada actuală, pe plan mondial și pe plan european, se desfășoară ample acțiuni de prefecționare a normelor de proiectare și execuție pentru construcții, în general, și pentru construcțiile cu structură de rezistență metalică, în particular.

În Europa, se elaborează norme tehnice în domeniul construcțiilor calitativ superioare, la care să se alinieze normele din țările membre ale comunității europene.

Și în Romania se desfășoară în prezent acțiuni de revizuire și perfecționare a standardelor și normativelor de proiectare.

Având în vedere cele de mai sus, autorii au considerat util și necesar să pună, prin lucrarea de față, la dispoziția specialiștilor în construcții metalice, atât o analiză a prevederilor din normele românești în vigoare sau actualizate, cât și prevederile corespunzătoare din alte norme (EUROCODE 3 și norme din alte țări care au servit sau urmează să servească la fundamentarea actualizării normelor românești).

Siguranța în exploatare a elementelor de construcții metalice poate fi cel mai bine pusă în legătură cu comportarea oțelului la diferite solicitări. În acest sens, conținutul capitolelor privind aliajele metalice, sudarea, ruperea metalelor și comportarea la solicitări repetate formează aspecte ale aceleiași probleme. Pentru înțelegerea fenomenelor fizice și orientarea corespunzătoare în alegerea soluțiilor celor mai potrivite, în lucrarea de față se face apel la unele noțiuni din metalurgia fizică și metalurgia mecanică.

Aceste aspecte împreună cu problemele legate de alcătuirea și calculul mijloacelor de îmbinare alcătuiesc conținutul Părții I a lucrării.

Luarea în considerare a proprietăților plastice ale oțelului și influența lor asupra comportării și siguranței elementelor de construcții metalice și a îmbinărilor acestora sunt evidențiate în diferite capitole ale lucrării, reflectându-se în concepția constructivă și în calculul de rezistență și stabilitate a elementelor structurilor metalice care alcătuiesc conținutul Părții a II-a a lucrării.

În paralel cu teoriile clasice de pierdere a stabilității barei ideale, fenomenele de instabilitate ale diferitelor elemente sunt tratate luând în considerare influența imperfecțiunilor geometrice și structurale asupra capacității portante a elementelor. Pentru structuri deosebit de importante, insta-

bilitatea elementelor este tratată în cadrul structurilor din care fac parte, așa cum reiese din tendințele recente, existente pe plan mondial.

Ca metodă de calcul pentru elementele metalice este utilizată metoda pe baza stărilor limită, care este prezentată comparativ cu prevederile altor norme, subliniindu-se aspectele legate de siguranța structurală.

În lucrare sunt făcute referiri și sunt cuprinse datele de bază pentru calculul și alcătuirea elementelor structurale.

Ultimul capitol (capitolul 16) reprezentând Partea a III-a a lucrării se referă la comportarea și calculul structurilor metalice supuse la acțiuni seismice. Problemele tratate pentru prima dată în țara noastră într-o lucrare din domeniul structurilor metalice, sunt bazate pe experiența existentă pe plan internațional rezultată din literatura de specialitate, precum și pe experiența dobândită în România, în special în ultima perioadă. Sunt puse în evidență particularitățile de conformare și calcul ale structurilor disipative, legate strâns de comportarea ductilă, în domeniul solicitărilor seismice. Se prezintă metodele de a realiza structuri disipative performante, cu scopul final de a evita pagubele materiale importante și de a preveni pierderile de vieți omenești.

Tratarea problemelor lucrării de față a ținut seama atât de nivelul realizărilor din diferite țări, cât și de experiența câștigată în țara noastră, încununare a unei intense și rodnice activități desfășurată în domeniul învățământului, cercetării, proiectării și execuției construcțiilor metalice.

Autorii aduc mulțumiri pe această cale tuturor celor care au sprijinit elaborarea acestei lucrări, prin materiale documentare sau direct, prin colaborare la redactarea unor paragrafe sau capitole.

De asemenea autorii mulțumesc celor care au contribuit la sponsorizarea editării prezentei lucrări:

— UZINELOR de PRODUSE SODICE — OCNA MUREȘ (domnilor ing-Ilie Morovan—director general și ec. Vasile Cristea—director economic);

— ANTREPRIZEI de CONSTRUCȚII, MONTAJE și REPARAȚII SIDERURGICE din GALAȚI (domnilor ing. Ștefan Prica — director general și dr. ing. Traian Stancic — director de antrepriză);

— SOCIETATEA COMERCIALĂ „PROIECT — GALAȚI" (domnilor ing. Mircea Chiriac — director general și dr. ing. Octav Cosovliu — consilier);

— SOCIETATEA COMERCIALĂ „CONFORT — GALAȚI" (domnilor ing. Liviu Dracinschi — director general și ing. Costel Eftinca — director tehnic).

Preface

This book represents the first volume belonging to the work,,Buildings with metal structure" and refers to the main aspects concerning the behaviour and design of their members.

The book contains the basic elements necessary to the design of metal structural members, their joints and connections.

The book is devoted to students of the Civil Engineering Faculties, to the post-graduate students and candidates for doctor's degree. The book may also be used by researchers and engineers in practice.

During the last years an intensive activity was developed in Europe and in the World with the purpose of improving the provisions of the existent structural codes for the design, fabrication and erection of the structures in general and for metal structures in particular.

Working committees consisting in the most part of professors and researchers are acting in order to obtaine better structural codes in order to be adopted in European Community Countries.

Taking into account the above mentioned facts, the authors think that in this book it is necessary to present to the steelwork designers both an analysis of the previsions of the present Romanian codes and these corresponding to other codes which had been attended or are to be attend in order to put-up-to-date Romanian steelwork codes.

The First Part of the book includes the main notions necessary for a better understanding of the basic behaviour of metals and structural members; dislocation theory and plastic behaviour, ductile and brittle fracture, corrosion behaviour, fatigue, weldability and welding processes, fasteners, different types of joints and connections are presented.

The Second Part of the book deals with the problems of section resistance and stability of structural members.

The aspects concerning two important phenomens namely members subject to torsion and plastic behaviour of steel members are included.

Special chapters refer to the stability of structural members. Flexural uckling and lateral — torsional buckling of centrally loaded members, ateral — torsional buckling of bent members, the collapse by excess of bending (in plane of applied moment) ant the collapse by lateral-torsional buckling of members subject to combined bending and compression loading are treated according to the concept of imperfections mechanical properties and residual stresses.

A whole chapter is devoted to present the problems concerning local buckling phenomenon of the steel structural members in elastic, plastic and postbuckling ranges.

The last Chapter (Chapter 16) representing also the Part Three of the book concerns the behaviour and design of the seismic resistant structures. The problems, presented for the first time in our country in a book devoted to steel structures, are based on the existing world experience resulting from technical literature and on the recent Romanian one. The main objective is

to design ductile, dissipative structures in order to avoid damage of buildings and to prevent loss of human life.

When the various problems were dealt with, both the level of technically developed countries and the valuable experience of Romanian specialists — as a result of their intensive and fruitfull activity in the field of universitary training and engineering practice — were taken into account.

The authors want to thank to all, persons and organizations, who gave assistance for the preparation of this book.

The autors are indebted to those who sponsored a part of the expenses concerning the publication of this book.

— The SODA PRODUCTS WORK—OCNA MUREȘ (to Mr. eng. Ilie Morovan — general manager, and Vasile Cristea — economical manager);

— To ENTERPRISE for CONSTRUCTION, ERECTION and REPAIRING for METALURGICAL PLANTS — GALAȚI (eng. Ștefan Prica — general manager and dr. eng. Traian Stancic — entreprise manager).

— To ENTERPRISE „PROIECT — GALAȚI" (eng. Mircea Chiriac — general manager and dr. eng. Octav Cosovliu — councillor adviser);

— To ENTERPRISE "CONFORT — GALAȚI" (eng. Liviu Dracinschi — general manager and eng. Costel Eftinca — technical manager).

CUPRINS

PARTEA I

COMPORTAREA METALELOR. MIJLOACE DE ASAMBLARE

1. MATERIALE FOLOSITE LA REALIZAREA STRUCTURILOR METALICE 25

1.1. Fonta ca materie semifabricată pentru elaborarea oțelului 25

1.2. Oțelul. Fabricarea oțelului și a produselor din oțel 26

1.2.1. Elaborarea oțelurilor carbon și a oțelurilor slab aliate 26

1.2.2. Fabricarea produselor din oțel. Laminarea. Alte procedee 30

1.3. Aliaje de aluminiu. Fabricarea aluminiului și a aliajelor de aluminiu . . . 32

1.4. Structura cristalină a metalelor 34

1.4.1. Rețeaua cristalină. Sisteme de cristalizare. 34

1.4.2. Cristalizarea primară. Transformările alotropice ale fierului 35

1. 5. Structura aliajelor metalice 36

1.5.1. Tipuri de aliaje 36

1.5.2. Structura oțelurilor carbon și a oțelurilor slab aliate 37

1.5.3. Recristalizarea. Structuri de laminare 40

1. 6. Influența elementelor de aliere asupra caracteristicilor mecanice ale oțelului 42

1.6.1. Influența carbonului 42

1.6.2. Influența manganului 42

1.6.3. Influența siliciului 42

1.6.4. Influența sulfului și a fosforului 43

1.6.5. Influența oxigenului și a hidrogenului 43

1.6.6. Influența azotului 43

1.6.7. Influența aluminiului 43

1.6.8. Influența vanadiului, titanului și niobiului 44

1.6.9. Influența nichelului 44

1.6.10. Influența cuprului 44

1.7. Tratamentele termice ale oțelurilor 45

1.7.1. Rolul tratamentelor termice 45

1.7.2. Tratamente termice aplicate elementelor din oțel 45

1.8. Oțeluri pentru structuri metalice 48

1.8.1. Oțeluri de uz general 49

1.8.2. Oțeluri rezistente la coroziune atmosferică 52

1.8.3. Oțeluri cu granulație fină pentru construcții sudate 53

1.8.4. Oțeluri cu rezistență la rupere fragilă la temperaturi joase și foarte joase (criogenice) 53

1.8.5. Oțeluri cu limita de curgere foarte ridicată 56

1.8.6. Oțeluri aliate pentru elemente speciale 56

1.9. Oțeluri prevăzute în normele altor țări 56

1.10. Structura aluminiului și a aliajelor de aluminiu 62

1.10.1. Structura cristalină 62

1.10.2. Maturizarea sau îmbătrânirea naturală 63

1.10.3. Aliaje de aluminiu folosite în construcții 66

2. COMPORTAREA ELEMENTELOR METALICE LA COROZIUNE 68
2.1. Considerații generale 68
2.2. Comportarea la coroziune și durabilitatea structurilor metalice exploatate în atmosferă industrială impurificată cu gaze agresive 69
2.3. Clasificarea tipurilor de coroziune în cadrul construcțiilor metalice 70
2.3.1. Clasificarea după criteriul naturii procesului de coroziune 70
2.3.2. Clasificarea după criteriul localizării procesului de coroziune 71
2.3.3. Clasificarea după criteriul sursei procesului de coroziune 72
2.4. Rolul solicitării mecanice și alcătuirii constructive asupra comportării la coroziune 74
2.4.1. Coroziunea sub stare de tensiune metalic 74
2.4.2. Rolul alcătuirii constructive a elementului metalic 76
2.5. Protecția anticorosivă a elementelor de construcții metalice industriale . 77
2.6. Încercări la coroziune 86
2.7. Recomandări privind prevenirea și protecția anticorozivă a construcțiilor metalice exploatate în atmosferă industrială 90

3.COMPORTAREA OȚELULUI 101
3.1. Elemente generale. 101
3.2. Concentrarea tensiunilor în elementele metalice 106
3.3. Criterii de cedare plastică a metalelor 107
3.4. Presiuni locale 109
3.5. Analiza comportării metalelor din punctul de vedere al metalurgiei mecanice 110
3.5.1. Elemente generale 110
3.5.2. Comportarea elastică a metalelor 110
3.5.3. Comportarea plastică a metalelor 111
3.5.4. Ruperea metalelor 116
3.5.5. Prevederi ale standardului european EURONORMEN 10025—1990 cu privire la încercările mecanice 125

4. SUDAREA 127
4.1. Elemente generale 127
4.2. Principiile procedeelor de sudare 128
4.3. Procedee de sudare 128
4.3.1. Procedee de sudare prin topire 128
4.3.2. Procedee de sudare prin presiune 133
4.4. Materiale pentru sudare 135
4.4.1. Electrozi pentru sudare cu arc electric 135
4.4.2. Sârmă și flux pentru sudare automată 136
4.5. Sudarea aluminiului și a aliajelor de aluminiu 139
4.5.1. Sudarea cu gaze 141
4.5.2. Sudarea electrică cu arc, cu electrozi înveliți 141
4.5.3. Sudarea aluminiului în atmosferă protectoare cu electrod nefuzibil (TIG) 141
4.5.4. Sudarea aluminiului în atmosferă protectoare de argon cu electrod fuzibil (MIG) 141
4.6. Tăierea metalelor 141
4.6.1. Tăierea cu flacără oxiacetilenică 142
4.6.2. Tăierea cu arc electric 143
4.6.3. Tăierea cu jet de plasmă 143

4.7. Îmbinări sudate 143
4. 7.1. Tipuri de îmbinări sudate 143
4. 7.2. Executarea cordoanelor de sudură 147
4.8. Metalurgia sudurii. Structura îmbinărilor sudate 148
4.9. Deformaţii şi tensiuni remanente din sudare 151
4.9.1. Tensiuni remanente din sudare 151
4.9.2. Mărimea tensiunilor remanente 153
4.9.3. Deformaţii produse la sudare 156
4.9.4. Măsuri pentru reducerea deformaţiilor 157
4.10. Comportarea şi calculul îmbinărilor sudate 159
4.10.1. Îmbinări cu sudură cap la cap (în adâncime) 159
4.10.2. Îmbinări cu suduri de colţ (în relief) 160
4.10.3. Îmbinări sudate la elemente din aliaje de aluminiu 168
4.11. Oţeluri pentru construcţii sudate 169
4.11.1. Rezistenţa la rupere fragilă şi comportarea la sudare 169
4.11.2. Alegerea clasei de calitate a oţelurilor pentru construcţii sudate. 171
4.11.3. Proiectarea la ruperea fragilă după alte normea 174
4.12. Completări şi comentarii comparative, referitoare la proiectarea sudurilor de colţ (în relief), după diferite norme 181
4.12.1. Norma franceză CM66 181
4.12.2. Norma suedeză BSK/89 182
4.12.3. Propunerea de normă unificată vesteuropeană EUROCODE 3/92 (EC3/92) 183
4.12.4. Comentarii finale 185

5. ÎMBINĂRI CU NITURI 188

5.1. Elemente generale. 188
5.2. Nituri. Alcătuirea îmbinărilor nituite 188
5.3. Solicitările niturilor. Eforturi capabile. 191
5.4. Comportarea şi calculul îmbinărilor nituite 193
5.4.1. Comportarea îmbinărilor nituite 193
5.4.2. Calculul îmbinărilor nituite 194

6. ÎMBINĂRI CU ŞURUBURI 197

6.1. Elemente generale. 197
6.2. Îmbinări cu şuruburi obişnuite 197
6.2.1. Şuruburi obişnuite 197
6.2.2. Tipuri de îmbinări cu şuruburi obişnuite. Comportarea lor . . . 199
6.2.3. Solicitările şuruburilor obişnuite. Eforturi capabile 200
6.2.4. Calculul îmbinărilor cu şuruburi obişnuite 204
6.3. Îmbinări cu şuruburi de înaltă rezistenţă pretensionate 210
6.3.1. Şuruburi de înaltă rezistenţă 210
6.3.2. Montarea şuruburilor de înaltă rezistenţă pretensionate în îmbinări 216
6.3.3. Tipuri de îmbinări cu şuruburi de înaltă rezistenţă pretensionate . . 226
6.3.4. Comportarea şi calculul îmbinărilor cu şuruburi de înaltă rezistenţă pretensionate. 226
6.4. Comportarea şi calculul prinderilor cu flanşe 234
6.4.1. Prinderi cu flanşe şi şuruburi obişnuite 234
6.4.2. Prinderi cu flanşe şi şuruburi de înaltă rezistenţă pretensionate . 237
6.5. Completări şi comentarii comparative referitoare la proiectarea îmbinărilor cu tije (şuruburi sau nituri), după diferite norme 237

6.5.1. Îmbinări lungi pe direcţia solicitării 237
6.5.2. Tipuri de găuri şi distanţe între găurile în care se introduc şuruburi 240
6.5.3. Comentarii finale privind evaluarea prin calcul a eforturilor capabile ale şuruburilor obişnuite 241

7. COMPORTAREA ELEMENTELOR METALICE SUPUSE LA SOLICITĂRI REPETATE 252

7.1. Fenomenul de oboseală a elementelor din oţel 252
7.2. Oboseala în domeniul durabilităţilor mari 254
7.2.1. Modul de solicitare repetată a elementelor din oţel 254
7.2.2. Reprezentarea rezultatelor încercărilor la oboseală 258
7.2.3. Factori care influenţează rezistenţa la oboseală 259
7.3. Solicitări cu amplitudini variabile 263
7.4. Verificarea elementelor supuse la oboseală în domeniul durabilităţilor mari 266
7.5. Măsuri constructive pentru reducerea efectului de oboseală 273
7.6. Oboseala în domeniul durabilităţilor mici 275
7.7. Metoda de calcul la oboseală bazată pe conceptul variaţiei tensiunii $\Delta\sigma$. Domeniul durabilităţilor mari 277
7.7.1. Elemente generale 277
7.7.2. Normele din S.U.A. 277
7.7.3. Normele europene EUROCODE 3 282
7.8. Oboseala în domeniul durabilităţilor mici în conceptul variaţiei tensiunii 297
7.9. Calculul la oboseală a grinzilor de rulare 299
7.10. Consideraţii finale 305
7.10.1. Domeniul durabilităţilor mari ($N \geqslant 10^5$ cicluri) 305
7.10.2. Domeniul durabilităţilor mici ($N < 10^4$ cicluri) 307

PARTEA A II-A

REZISTENŢA ŞI STABILITATEA ELEMENTELOR STRUCTURILOR METALICE

A. REZISTENŢA ELEMENTELOR STRUCTURALE

8. ALCĂTUIREA ŞI CALCULUL DE REZISTENŢĂ AL ELEMENTELOR SUPUSE LA FORŢE AXIALE, MOMENTE ÎNCOVOIETOARE ŞI LA SOLICITĂRI COMBINATE 309

8.1. Principii generale de alcătuire şi calcul 309
8.1.1. Alcătuirea elementelor 309
8.1.2. Clasificarea secţiunilor transversale 310
8.2. Bare supuse la eforturi axiale 315
8.2.1. Alcătuirea barelor 315
8.2.2. Solidarizarea barelor 316
8.2.3. Calculul barelor supuse la întindere axială 319
8.2.4. Calculul barelor supuse la compresiune axială 321
8.3. Bare cu secţiune plină solicitate la încovoiere 322
8.3.1. Alcătuirea elementelor 322
8.3.2. Calculul de rezistenţă al elementelor încovoiate 325
8.4. Elemente cu secţiune plină supuse la forţă axială şi momente încovoietoare 327

8.5. Efectul tensiunilor tangențiale asupra distribuției tensiunilor normale în tălpile grinzilor 328
8.6. Considerații finale 330

9. COMPORTAREA ȘI CALCULUL ELEMENTELOR SUPUSE LA RĂSUCIRE . 330

9.1. Noțiuni generale 330
9.2. Răsucirea cu deplanare liberă 332
9.2.1. Elemente cu secțiune deschisă 332
9.2.2. Elemente cu secțiune închisă 334
9.2.3. Variația momentelor de răsucire în lungul unei bare 335
9.3. Răsucirea cu deplanare împiedicată 335
9.3.1. Elemente generale 335
9.3.2. Centrul de răsucire 336
9.3.3. Determinarea tensiunilor τ_ω și σ_ω 338
9.3.4. Ecuația diferențială a răsucirii cu deplanare împiedicată 341
9.3.5. Influența forței axiale 351
9.4. Exemple de calcul 352
9.4.1. Determinarea caracteristicilor sectoriale pentru un profil U. 352
9.4.2. Caracteristicile sectoriale la o secțiune dublu T cu tălpi inegale . . 357
9.4.3. Caracteristici sectoriale pentru unele secțiuni I 359
9.4.4. Consolă solicitată la încovoiere și răsucire 359
9.5. Considerații finale 362

10. COMPORTAREA ȘI CALCULUL ELEMENTELOR ÎNCOVOIATE ÎN DOMENIUL ELASTOPLASTIC 363

10.1. Încovoierea în domeniul elastic și plastic 363
10.2. Comportarea și calculul elementelor solicitate în domeniul elasto-plastic . 364
10.3. Comportarea elementelor supuse la solicitări repetate de încovoiere în domeniul elasto-plastic. Tensiuni remanente 368
10.3.1. Încărcări și descărcări repetate 368
10.3.2. Comportarea elementelor la acțiunea momentelor încovoietoare de sens contrar 369
10.3.3. Distrugerea elementelor încovoiate datorită unor deformații plastice ale fibrelor exterioare în regim de solicitare alternantă 370
10.4. Diferite influențe asupra valorii momentului plastic 370
10.4.1. Influența tensiunilor remanente de origine termică sau mecanică 370
10.4.2. Influența forței tăietoare 371
10.4.3. Influența eforturilor axiale 373
10.5. Prevederi din diferite norme, referitoare la calculul plastic al elementelor metalice 376
10.5.1. Normele belgiene B51—002/88 376
10.5.2. Prevederile normelor utilizate în Franța 379
10.5.3. Normele europene EUROCODE 3 384
10.6. Considerații finale 390

B. STABILITATEA ELEMENTELOR DE STRUCTURI METALICE 391

11. STABILITATEA GENERALĂ A ELEMENTELOR COMPRIMATE CENTRIC 391

11.1. Introducere. Fenomene de pierdere a stabilității 391
11.2. Flambajul prin încovoiere al barelor comprimate centric 392
11.2.1. Determinarea forțelor critice pentru bara dreaptă fără imperfecțiuni 392

11.2.2. Influenţe care modifică forţa critică a barelor comprimate 397
11.2.3. Metoda divergenţei echilibrului, cu considerarea imperfecţiunilor structurale şi a imperfecţiunilor geometrice 400
11.2.4. Prevederile normelor din România 406
11.3. Flambajul barelor alcătuite din elemente depărtate solidarizate discontinuu 410
11.3.1. Particularităţi ale fenomenului de flambaj 410
11.3.2. Determinarea forţei tăietoare şi influenţa acesteia asupra forţei critice de flambaj 410
11.3.3. Solicitările plăcuţelor şi zăbrelelor 413
11.4. Flambajul prin încovoiere-răsucire al barelor comprimate 415
11.4.1. Bare cu secţiunea având o singură axă de simetrie 415
11.4.2. Bare cu secţiunea fără axă de simetrie 418
11.4.3. Calculul barelor comprimate cu secţiunea monosimetrică, care îşi pierd stabilitatea prin încovoiere-răsucire 420
11.4.4. Calculul barelor comprimate cu două axe de simetrie care îşi pierd stabilitatea prin răsucire 421
11.5. Verificarea prin calcul a barelor comprimate centric conform normelor din România 423
11.5.1. Verificarea stabilităţii generale (verificare la flambaj) 423
11.5.2. Calculul elementelor de solidarizare 433
11.5.3. Verificarea rigidităţii 435
11.5.4. Verificarea stabilităţii locale 436
11.5.5. Verificarea de rezistenţă 436
11.6. Cercetări şi norme din alte ţări 437
11.6.1. Flambajul prin încovoiere al barelor cu secţiune plină 437
11.6.2. Flambajul barelor alcătuite din elemente depărtate solidarizate discontinuu 446
11.6.3. Flambajul prin încovoiere-răsucire al barelor comprimate 452
11.7. Lungimi de flambaj ale barelor comprimate 452
11.7.1. Elemente generale 452
11.7.2. Lungimile de flambaj pentru bare care fac parte din grinzi cu zăbrele 455
11.7.3. Lungimi de flambaj pentru bare care fac parte din structuri în cadre cu un nivel (stâlpi) 456
11.7.4. Lungimi de flambaj pentru bare care fac parte din structuri în cadre cu mai multe niveluri 460
11.8. Consideraţii finale 467

12. VOALAREA PLĂCILOR PLANE 469

12.1. Fenomenul de voalare 469
12.2. Rezistenţe critice de voalare în domeniul elastic 470
12.3. Voalarea plăcilor plane sub acţiunea solicitărilor complexe 476
12.4. Influenţa voalării asupra capacităţii portante a elementelor 476
12.5. Voalarea în domeniul plastic a plăcilor supuse la tensiuni normale de compresiune uniformă şi neuniformă 480
12.5.1. Fenomenul. Relaţii de calcul 480
12.5.2. Clasificarea secţiunilor elementelor metalice 481
12.6. Asigurarea împotriva fenomenelor de voalare a tălpilor şi inimilor elementelor 482
12.6.1. Elemente generale 482
12.6.2. Verificarea la voalare a inimilor grinzilor supuse la solicitări simple 487
12.6.3. Verificarea la voalare a inimilor grinzilor supuse la solicitări complexe 492
12.6.4. Verificarea la voalare în metoda rezistenţelor admisibile 498

12.7. Comportarea și calculul plăcilor în domeniul postcritic 500
12.7.1. Comportarea și calculul plăcilor comprimate 500
12.7.2. Capacitatea portantă a inimilor grinzilor 509
12.8. Prevederi referitoare la voalare în normele din diferite țări 520
12.8.1. Normele din Belgia, Germania, Italia, Olanda 520
12.8.2. Prevederile normei britanice 524
12.8.3. Prevederile normei EUROCODE 3 531
12.8.4. Prevederile normelor din S U(AISC—ASD—PD, 1992) 544
12.8.5. Prevederile normelor din S.U.A. (AISC—LRFD—1986) 549
12.9. Considerații finale 555

13. STABILITATEA GENERALĂ A ELEMENTELOR ÎNCOVOIATE 557
13.1. Aspecte generale. Producerea fenomenului de pierdere a stabilității elementalor încovoiate 557
13.2. Instabilitatea în domeniul elastic 558
13.3. Instabilitatea în domeniul inelastic 564
13.3.1. Domeniul de producere a fenomenului. Modul în care este considerat în calcul 546
13.3.2. Cerințe impuse elementelor de legătură 564
13.4. Modul de calcul prevăzut în normele din România. 565
13.5. Prevederi referitoare la stabilitatea generală a grinzilor în normele dindiferite țări 570
13.5.1. Prevederile normelor din Belgia 570
13.5.2. Prevederile normelor din Germania 572
13.5.3. Prevederile normelor din Anglia 576
13.5.4. Prevederile normelor din Franța 580
13.5.5. Prevederile normelor din Italia 581
13.5.6. Prevederile normei EUROCODE 3 585
13.5.7. Normele din S.U.A. (rezistențe admisibile) 591
13.5.8. Normele din S.U.A. (stări limită) 593
13.6. Considerații finale 597

14. STABILITATEA ELEMENTELOR SUPUSR LA COMPRRSIUNE ȘI ÎNCOVOIERE 600
14.1. Aspecte generale. Producerea fenomenelor 600
14.2. Bare care cedează prin plastificarea secțiunilor celor mai solicitate . . . 601
14.2.1. Comportare. Solicitări limită 601
14.2.2. Bazele metodelor de calcul aplicate în practică 604
14.3. Bare care își pierd stabilitatea prin încovoiere-răsucire 606
14.3.1. Comportare. Solicitări limită 606
14.3.2. Bazele metodelor de calcul aplicate în practică 607
14.4. Prevederi referitoare la pierderea stabilității generale a elementelor comprimate și încovoiate în normele din diferite țări 610
14.4.1. Prevederile normelor din Belgia 610
14.4.2. Prevederile normelor din Germania 611
14.4.3. Prevederile normelor din Anglia 615
14.4.4. Prevedreile normelor din Franța 618
14.4.5. Prevederile normelor din Italia 619
14.4.6. Prevederile normei EUROCODE 3 621
14.4.7. Normele din S.U.A. (rezistențe admisibile) 624
14.4.8. Normele din S.U.A. (stări limită) 626
14.5. Considerații finale 629

15. METODE DE CALCUL ALE CONSTRUCȚIILOR METALICE 632
15.1. Metoda stărilor limită în normele din România 632
15.1.1. Principiile metodei 632
15.1.2. Caracteristicile materialelor, elementelor și structurilor metalice . 633
15.1.3. Acțiuni. Grupări de acțiuni 635
15.1.4. Încărcări și solicitări de calcul 636
15.1.5. Relații de calcul pentru elemente de construcții metalice 636
15.2. Metoda rezistențelor admisibile 637
15.2.1. Relații de calcul 637
15.2.2. Considerații privind aplicarea metodelor de calcul 638
15.3. Metoda stărilor limită în alte norme 638
15.3.1. Normele din Anglia 638
15.3.2. Proiectul de normă europeană EUROCODE 3 — 1992 639
15.3.3. Normele din S.U.A. (AISC—LRFD — 1986) 640

PARTEA A III-A

COMPORTAREA CONSTRUCȚIILOR CU STRUCTURĂ METALICĂ AMPLASATE IN ZONE SEISMICE

16. ALCĂTUIREA ȘI CALCULUL STRUCTURILOR METALICE SUPUSE LA ACȚIUNI SEISMICE 642
16.1. Introducere 642
16.2. Stări limită pentru structurile metalice amplasate în zone seismice . . . 643
16.3. Factorul de comportare 645
16.4. Tipuri de structuri 649
16.4.1. Structuri în cadre 649
16.4.2. Cadre contravântuite cu diagonale centrate la noduri 656
16.4.3. Cadre contravântuite cu diagonale prinse excentric la noduri . . . 657
16.5. Comportarea prinderilor 657
16.5.1. Prinderile grinzilor de stâlpi la structuri în cadre 657
16.5.2. Comportarea la solicitări ciclice 658
16.5.3. Prinderi comune ale grinzilor și diagonalelor pe stâlpi 660
16.6. Comportarea la acțiuni seismice a structurilor cu diagonale prinse centric la noduri 660
16.6.1. Structuri cu diagonale care lucrează numai la întindere 660
16.6.2. Structuri cu diagonale în V și în V inversat 663
16.6.3. Particularități ale folosirii structurilor cu diagonale centrate la noduri 663
16.7. Particularități ale alcătuirii și calculului la acțiuni seismice a structurilor cu diagonale prinse excentric la noduri 664
16.7.1. Elemente generale 664
16.7.2. Configurații geometrice pentru cadre contravântuite excentric . . . 666
16.7.3. Comportarea barelor disipative 668
16.7.4. Clasificarea barelor disipative. Particularități de comportare . . . 670
16.7.5. Capacități de rezistență plastice ale barelor disipative 671
16.7.6. Rigidizările barelor disipative 671
16.7.7. Recomandări de proiectare 674
16.7.8. Aspecte privind conlucrarea barelor disipative cu plăcile din beton armat ale planșeelor 680

16.7.9. Concluzii finale privind proiectarea rațională a cadrelor contravântuite excentric 681
16.8. Alte tipuri de structuri cu proprietăți disipative 681
16.8.1. Structuri cu bare disipative amplasate în afara grinzilor cadrului metalic 682
16.8.2. Alte aplicații ale barelor disipative din oțel 684
16.8.3. Structuri cu diafragme cu panouri de forfecare metalice 685
16.8.4. Soluții disipative bazate pe comportarea prinderilor și îmbădirilor semirigide 687
16.9. Concluzii privind comportarea structurilor din oțel sau mixte supuse la acțiunea seismului din 1977 691
16.9.1. Clădiri multietajate 691
16.9.2. Hale cu structură metalică sau mixtă 692
16.10. Alcătuirea constructivă a structurilor. Bare și prinderi. Elemente stabilizatoare. Exemple de structuri amplasate în zone seismice 693
16.10.1. Alcătuirea structurilor. Bare și prinderi 693
16.10.2. Lungimi de flambaj. Elemente stabilizatoare 696
16.10.3. Exemple de structuri realizate de specialiști români 699
16.11. Norme de proiectare seismică din diferite țări 699
16.11.1. Încărcări. Grupări de încărcări. Deformații limită 699
16.11.2. Alcătuirea și calculul cadrelor necontravântuite 716
16.11.3. Alcătuirea și calculul cadrelor contravântuite centric 722
16.11.4. Alcătuirea și calculul cadrelor contravântuite excentric 725
16.11.5. Aspecte referitoare la comportarea structurilor metalice multietajate supuse la acțiunea seismelor severe 727
16.12. Calculul structurilor metalice supuse la acțiuni seismice 733
16.12.1. Metoda de proiectare curentă (statică și dinamică liniară) . . . 733
16.12.2. Metoda de proiectare aprofundată (statică și dinamică neliniară). 734
16.12.3. Aplicarea practică a metodelor de calcul structural 735
Bibliografie 741
Anexe 759

CONTENTS

PART ONE

BEHAVIOUR OF METALS, JOINTS AND FASTENERS

1. MATERIALS USED FOR METAL STRUCTURES 25

1. 1. Iron, Semi-Fabricated Material of Steel. Blast Furnace 26
1. 2. Steel. Fabrication of Steel and Steel Products. 26
1. 2.1. Fabrication of Carbon Steel and Low-Alloy Steel. (Open Hearth Furnace. Basic Oxygen Furnace. Electric-Arc Furnace, Ingot Molds Discontinuons Casting. Continuous Casting. Rimmed, Killed, Semi-killed Steels.) 26
1. 2.2. Fabrication of Steel Products. Primary Rolling Mills. Rolling of Finished Products. Other Fabrications Procedures 30
1. 3. Aluminium Alloys. Fabrication of Aluminium Shapes 32
1. 4. Crystalline Structure of Metals 34
1. 4.1. Crystalline Structure of Iron. (Body-Centred-Cubic Crystal Structure. Face-Centred-Cubic Crystal Structure.) 34
1. 4.2. Allotropy of Iron 35
1. 5. Structure of Metal Alloys 36
1. 5.1. Types of Alloys 36
1. 5.2. Structure of Carbon and Low-Alloy Steels 37
1. 5.3. Recristalization. Rolling Structures 40
1. 6. The Influence of the Chemical Composition on the Mechanical Properties of Steel. 42
1. 6.1. Influence of Carbon 42
1. 6.2. Influence of Manganese 42
1. 6.3. Influence of Silicon 42
1. 6.4. Influence of Sulfur and Phosphorus 43
1. 6.5. Influence of Oxygen and Hydrogen 43
1. 6.6. Influence of Nitrogen 43
1. 6.7. Influence of Aluminium 43
1. 6.8. Influence of Vanadium, Titan and Niobium 44
1. 6.9. Influence of Nickel 44
1.6.10. Influence of Copper 44
1. 7. Heat Treatments of Steel 45
1. 7.1. Role of Heat-Treatments 45
1. 7.2. Heat Treatments Applied to Steel Products. (Annealing. Normalizing, Stress Relieving. Quenching and Tempering. Controlled Rolling.) . 45
1. 8. Structural Steels 48
1. 8.1. Steels for General Structural Purpose, Carbon Steels. High Strength Low-Alloy Steels 49
1. 8.2. Steels with Improved Atmospheric Corrosion Resistance. (Weathering Steels) 52
1. 8.3. Weldable Fine-Grain Steels, Normalized 53
1. 8.4. Cryogenic Steels 53

1. 8.5. Quenched and Tempered Low-Alloy High Strenght Steels 56
1. 8.6. Alloy Steels for Special Members and Fasteners 56
1. 9. Steels Used in Other Countries 56
1.10. Aluminum Alloys 62
1.10.1. Crystaline Structure 62
1.10.2. Aging of Aluminium Alloys 63
1.10.3. Aluminum Alloys Used for Structural Members 66

2. BEHAVIOUR OF THE STEEL ELEMENTS AT THE CORROSION ACTION 68

2. 1. General Consideration 68
2. 2. Behaviour at the Corrosion Action and Durability of the Steel Structural Elements, Exploited in Industrial Environment with Chemical Aggressivness 69
2. 3. Classification of the Corrosion Types with steel structure 70
2. 3.1. Classification by the Criterion of the Nature of Corrosion Process 70
2. 3.2. Classification by the Criterion of the Localization of Corrosive Process 71
2. 3.3. Classification by the Criterion of the Source of Corrosion Process 72
2. 4. Influence of the Load and Constructive Making Over Corrosion Behaviour 74
2. 4.1. Stress Corrosion 74
2. 4.2. Influence of Constructive Making of the Steel Elements 76
2. 5. Corrosion Protection of Industrial Steel Constructions 77
2. 6. Corrosion Test 86
2. 7. Recommendations Referring to Corrosive Prevention and Protection of Steel Structures. Exploited in Industrial Environment with Chemical Aggressivness 90

3. THE BEHAVIOUR OF STRUCTURAL STEELS 101

3. 1. General Consideration 101
3. 2. Stress Concentration in Metal Members 106
3. 3. Yielding Criteria of Metals 107
3. 4. Local Bearing 109
3. 5. Metal Behaviour Explained in Terms of Mechanical Metallurgy 110
3.5 .1. Main Notions 110
3. 5.2. Elastic Behaviour of Metals 110
3. 5.3. Plastic Behaviour of Metals. Theory of Dislocations 111
3. 5.4. Metal Fracture: Ductile Fracture, Brittle Fracture. Impact Strength. Fracture Toughness. 116
3. 5.5. Provisions of the EURONORM EN 10025—90 concerning the Mechanical Tests 125

4. WELDING AND WELDED CONNECTIONS 127

4. 1. Introduction 127
4. 2. Principles of Welding Processes 128
4. 3. Welding Processes. 128
4. 3.1. Arc Welding Processes (Manual Shielded Metal-Arc Welding, Submerged Arc Welding, Gas Metal-Arc Welding) 128
4. 3.2. Resistance Welding. (Spot Welding. Resistance Seam Welding. Flash Butt Welding.) 133
4. 4. Welding Materials 135
4. 4.1. Electrodes. Coating of Electrodes 135
4. 4.2. Wire and Flux for Submerged Automatic Arc-Welding 136

4. 5. Welding of Aluminum and Aluminum Allyos 139
4. 5.1. Gas Welding 141
4. 5.2. Arc Welding with Coated Electrodes 141
4. 5.3. TIG Welding 141
4. 5.4. MIG Welding 141
4. 6. Cutting of Metals 141
4. 6.1. Flame Cutting 141
4. 6.2. Arc Cutting 142
4.6. 3. Plasma Cutting 143
4. 7. Welded Connections 143
4. 7.1. Types of Welded Connections 143
4. 7.2. Joints Preparation and Welds Execution 147
4. 8. Welding Metallurgy. Crystalline Structure of Welds 148
4. 9. Shrinkage and Residual Stresses Due to Welding 151
4. 9.1. Residual Stresses 151
4. 9.2. Calculation of Residual Stresses 153
4. 9.3. Shrinkage and Distortion 156
4. 9.4. Practical Procedure for Reducing Shrinkage and Distortion 157
4.10. Behaviour and Desing of Welded Connections 159
4.10.1. Butt Weld Joints 159
4.10.2. Fillet Weld Joints 160
4.10.3. Welded Joints of Aluminum Members 168
4.11. Steels for Welded Members 169
4.11.1. Fracture Toughness and Welding Behaviour 169
4.11.2. Selection of Steels for Welded Structures 171
4.11.3. Design against Brittle Fracture in various Codes 174
4.12. Supplementary Data and Comments concerning the Desing of Fillet Welds according to various Standards. 181
4.12.1. Standard from France 181
4.12.2. Standard from Sweden 182
4.12.3. The EUROCODE 3 183
4.12.4. Final Comments 185

5. RIVETED JOINTS 188

5. 1. Introduction 188
5. 2. Rivets. Riveted Joints 188
5. 3. Behaviour of Rivets. 191
5. 4. Behaviour and Design of Riveted Joints 193
5. 4.1. Behaviour of Riveted Joints 193
5. 4.2. Design of Riveted Joints 194

6. BOLTS AND BOLTED CONNECTIONS 197

6. 1. Introduction 197
6. 2. Connections with Ordinary (Bearing) Bolts 197
6. 2.1. Types of Bolts 197
6. 2.2. Behaviour of Connections with Ordinary Bolts 199
6. 2.3. Strengths of Bolts 200
6. 2.4. Design of Bolted Joints 204
6. 3. Friction Joints with High-Strength Bolts 210
6. 3.1. High-Strength Bolts 210
6. 3.2. Mounting Processes of High-Strength Bolts in Friction Joints . . . 216

6. 3.3. Types of Friction Joints 226
6. 3.4. Behaviour and Design of Friction Joints 226
6. 4. Beam to Column End Plate Connections. Behaviour and Design 234
6. 4.1. Connections with Ordinary Bolts 234
6. 4.2. Connections with Prestressed High-Strenght Bolts 237
6. 5. Supplementary Data and Comments concerning the Design of bolted Joints according to various. Standards 237
6. 5.1. Long Joints 237
6. 5.2. Positioning of Holes for Bolts; Types of Holes 240
6. 5.3. Final Comments concerning the Design of Bearing Bolts 241

7. FAILURE OF METAL MEMBERS SUBJECTED TO REPEATED LOADING 252

7. 1. Fatigue of Steel Members. High Cycle Fatigue. Low Cycle Fatigue 252
7.2 . High Cycle Fatigue 254
7. 2.1. Nature of Fatigue Loading 254
7. 2.2. Representation of Fatigue Tests 258
7. 2.3. Factors Affecting the Fatigue Tests Results (Steel Strength : Notches, Bolt Holes, Welds Defects, Residual Stresses, Steel Grade) 259
7. 3. Variable Loading. Cumulative Damage 263
7. 4. Design of Members Subject to High Cycle Fatigue 266
7. 5. Design Improvements for Reducing Fatigue Effect 273
7. 6. Low Cycle Fatigue 275
7. 7. Design Methods Based on the Concept of Stress Range. High Cycle Fatigue 277
7. 7.1. General 277
7. 7.2. U.S.A. Specifications 277
7. 7.3. European Specification EUROCODE 3 282
7. 8. Low Cycle Fatigue in Terms of the Concept of Stress Range 297
7. 9. Fatigue Design of Crane Runway Girders 299
7.10. Final Considerations 305
7.10.1. High Cycle Fatigue Ronge ($N \geqslant 10^5$) 305
7.10.2. Low Cycle Fatigue Ronge ($N < 10^4$) 307

PART TWO

STRENGTH AND STABILITY OF STRUCTURAL STEEL MEMBERS

A. STRENGTH OF STEEL MEMBERS

8. DESIGN OF MEMBERS SUBJECTED TO AXIAL FORCES, BENDING MOMENTS, COMBINED STRESSES 309

8. 1. General Principles 309
8. 1.1. Shapes of Members 309
8. 1.2. Classes of Cross Sections 310
8. 2. Members Subjected to Axial Forces 315
8. 2.1. Shapes of Membres 315
8. 2.2. Built-up Members 316
8. 2.3. Design of Tensioned Members 319
8. 2.4. Design of Compressed Members 321

8. 3. Beams and Girders Subjected to Bending 322
8. 3.1. Shapes of Bent Members 322
8. 3.2. Design of Bent Members 325
8. 4. Members Submitted to Combined Axial Forces and Bending Moments . . 527
8. 5. Shear Lag Effects 328
8. 6. Final Considerations 330

9. BEHAVIOUR AND DESIGN OF MEMBERS SUBJECTED TO TORSIONAL LOADING 330
9. 1. General Notions 330
9. 2. Uniform (Pure) Torsion 332
9. 2.1. Open Section Members 332
9. 2.2. Box Section Members 334
9. 2.3. Torsional Moment Gradient 335
9. 3. Torsion due to Warping. Mixed Torsion 335
9. 3.1. General Notions 335
9. 3.2. Shear Center 336
9. 3.3. Stresses produced by Mixed Torsion 338
9. 3.4. The Differential Equation of Mixed Torsion 341
9. 3.5. Influence of Axial Forces 351
9. 4. Design Exemples 352
9. 4.1. Sectorial Characteristics of Channels 352
9. 4.2. Sectorial Characteristics of Monosymetrical I Shapes 357
9. 4.3. Sectorial Characteristics of Various Shapes 359
9. 4.4. Cantilever Channel subjected to Combined Bending and Torsion . . 359
9. 5. Final Considerations 362

10. BEHAVIOUR AND DESIGN OF BENT MEMBERS IN ELASTIC-PLASTIC RANGE 363
10.1. Bending in Elastic and Plastic Range 363
10.2. Behaviour and Design of Members in Elastic-Plastic Range 364
10.3. Behaviour of Members Subject to Repeated Bending Moments in Elastic-Plastic Range. Residual Stresses by Unloading 368
10.3.1. Repeated Loading and Unloading 368
10.3.2. Bauschinger Effect 369
10.3.3. Failure of Members under Stress Reversal. Low Cycle Fatigue in Bending 370
10.4. Influences on Plastic Bending Moment 370
10.4.1. Influence of Residual Stresses 370
10.4.2. Influence of Shear Stresses 371
10.4.3. Influence of Axial Forces 373
10.5. Plastic Design in Various Specifications 376
10.5.1. Provisions of Belgium Specification 376
10.5.2. Provisions of French Specification 379
10.5.3. Provisions of EUROCODE 3 384
10.6. Final Considerations 390

B. STABILITY OF STEEL MEMBERS 391

11. STABILITY OF CENTRALLY LOADED STEEL MEMBERS 391
11.1. Introduction. Instability Phenomena 391
11.2. Flexural Buckling of Centrally Loaded Members 392

11.2.1. Critical Load. Theory of Straight Member. Tangent Modulus Load, Reduced Modulus Load, Refined Tangent Modulus Load 392
11.2.2. Influences Affecting the Critical Load. Residual Stresses, Geometric Imperfections 397
11.2.3. Theories Concerning the Buckling of Compressed Members. Bifurcation of Equilibrium. Divregence of Equilibrium (Strength Theory). Multiple Column Curves 400
11.2.4. Multiple Column Curves of Compressed Members according to Romanian Standard 406
11.3. Flexural Buckling of Built-up Members. Struts with Batten-Plates. Laced Struts 410
11.3.1. Phenomenon 410
11.3.2. Internal Shear. Forces Acting on Lacing and Battens 410
11.3.3. Strenght of Lacing and Battens 413
11.4. Lateral-Torsional Buckling of Centrally Loaded Members 415
11.4.1. Members with Monosymmetric Cross Section 415
11.4.2. Members with Nonsymmetric Cross Section 418
11.4.3. Design of Members with Monosymmetric Cross Section 420
11.4.4. Torsional Buckling of Members with Symmetric Cross Section . . 421
11.5. Design of Centrally Loaded Members according to the Romanian Standard 423
11.5.1. Check of Member Buckling 423
11.5.2. Check of Lacings and Battens 433
11.5.3. Check of Stiffeness 435
11.5.4. Check of Local Buckling 436
11.5.5. Check of Strength 436
11.6. Research Works and Provisons of Codes in Various Countries 437
11.6.1. Flexural Buckling of Members 437
11.6.2. Flexural Buckling of Bulit-up Members 446
11.6.3. Lateral-Torsional Buckling of Centrally Loaded Members 452
11.7. Effective (Buckling) Length of Centrally Loaded Members 452
11.7.1. Introduction 452
11.7.2. Effective (Buckling) Length of Members belonging to Trusses . . 455
11.7.3. Effective (Buckling) Length of Members belonging to Single-Storey Frames 456
11.7.4. Effective (Buckling) Lenght of Members belonging to Multi-Storey Frames 460
11.8. Final Considerations 467

12. LOCAL BUCKLING OF FLAT PLATES 469
12.1. Local Buckling Phenomena 469
12.2. Buckling Stresses in Elastic Range 470
12.3. Local Buckling under Combined Stresses 476
12.4. Influence of Local Buckling on the Load Carrying Capacity of Members. Postbuckling Behaviour 476
12.5. Local Buckling in Plastic Range 480
12.5.1. Phenomena. Design Formulae 480
12.5.2. Classification of Cross Sections 481
12.6. Design Formulae in Order to avoid the Local Buckling of Flanges and Webs. Provisions of Romanian Standard 482
12.6.1. Generalities. (Field of Application) 482

12.6.2. Beams and Girders. Local Buckling of Webs Subjected to Simple Stresses . . . 487
12.6.3. Beams and Girders. Local Buckling of Webs Subjected to Complex Stresses . . . 492
12.6.4. Local Buckling Formulae according to Allowable Stress Design . 498
12.7. Behaviour and Design of Flat Plates in Postbuckling Range 500
12.7.1. Behaviour and Design of Compressed Plates 500
12.7.2. Strenght of Girder Webs. Strength in Bending. Strenght in Shear. 509
12.8. Provisions Concerning the Strength of Webs in various Standards 520
12.8.1. Standards from Belgium, Germany, Italy, Holland 520
12.8.2. Standard from United Kingdom 524
12.8.3. EUROCODE 3 531
12.8.4. U.S.A. Specification AISC—ASD—PD (Allowable Stress Design-Plastic Design) 544
12.8.5. U.S.A. Specification. AISC—LRFD (Load and Resistance Factor Design) 549
12.9. Final Considerations 555

13. LATERAL-TORSIONAL BUCKLING OF BENT MEMBERS 557
13.1. Behaviour of Laterally Unsuported Bent Members 557
13.2. Lateral-Torsional Buckling in Elastic Range 558
13.3. Inelastic Buckling 564
13.3.1. Range of Behaviour. Design Checks 564
13.3.2. Conditions Imposed to Bracing 564
13.4. Design Provisions in the Romanian Standard 565
13.5. Design Provisions in Standards from Other Countries 570
13.5.1. Design Provisions in Belgium 570
13.5.2. Design Provisions in Germany. 572
13.5.3. Design Provisions in United Kingdom 576
13.5.4. Design Provisions in France 580
13.5.5. Design Provisions in Italy 581
13.5.6. Design Provisions in EUROCODE 3 585
13.5.7. Design Provisions in U.S.A. (ASD) 591
13.5.8. Design Provisions in U.S.A. (LRFD) 593
13.6. Final Considerations 597

14. BEAM-COLUMNS. (MEMBERS SUBJECTED TO BENDING AND THRUST) 600
14.1. General Notions. Behaviour of Beam-Columns 600
14.2. Collapse by Excess of Bending in Plane of Applied Moment 601
14.2.1. Behaviour. Limit of Strength 601
14.2.2. Design Methods Applied in Practice 604
14.3. Collapse by Lateral-Torsional Buckling 606
14.3.1. Behaviour. Limit of Strength 606
14.3.2. Design Methods Applied in Romania 607
14.4. Design Provisions in Standards from Other Countries 610
14.4.1. Design Provisions in Belgium 610
14.4.2. Design Provisions in Germany 611
14.4.3. Design Provisions in United Kingdom 615
14.4.4. Design Provisions in France 618
14.4.5. Design Provisions in Italy 619
14.4.6. Design Provisions in EUROCODE 3 621

14.4.7. Design Provisions in U.S.A. (ASD) 624
14.4.8. Design Provisions in U.S.A. (LRFD) 626
14.5. Final Considerations 629

15. DESIGN METHODS FOR METAL STRUCTURES 632

15.1. Limit States Design Method 632
15.1.1. Method Bases 632
15.1.2. Material's Characteristics 633
15.1.3. Loads. Combinations of Loads 635
15.1.4. Loads and Design Stresses 636
15.1.5. Design Formulae for Metal Structural Members 636
15.2. Allowable Stress Design Methods 637
15.2.1. Design Formulae 637
15.2.2. Considerations on Design Methods. Field of Application 638
15.3. Limit States Method in Various Countries 638
15.4.1. Limit States Method in United Kingdom 638
15.3.2. Limit States Method in EUROCODE 3 639
15.3.3. Limit States Method in U.S.A. 640

PART THREE

BEHAVIOUR OF STEEL STRUCTURES LOCATED IN SEISMIC AREAS

16. DESIGN OF STEEL STRUCTURES SUBJECTED TO SEISMIC LOADS . 642

16.1. Introduction 642
16.2. Limit States of Steel Structures located in Seismic Areas 643
16.3. Behaviour Factor 645
16.4. Typologies of Structures Resistent to Horizontal Forces 649
16.4.1. Moment-Resistant Frames 649
16.4.2. Concentrically braced Frames 656
16.4.3. Eccentrically braced Frames. 657
16.5. Behaviour of Connections 657
16.5.1. Beam to — Column Connections Belonging to Moment — Resistant. Frames 657
16.5.2. Cyclic Behaviour of Connections 658
16.5.3. Complex Connections of Beams and Diagonals 660
16.6. Behaviour of Steel Structures Subject to Seismic Forces 660
16.6.1. Structures with Tension Diagonals 660
16.6.2. Structures with V and inverted V Diagonals 663
16.6.3. Characteristics of the Behaviour of Structures with Concentric Diagonals 663
16.7. Characteristics of the Design of Steel Structures with Eccentric Diagonals 664
16.7.1. Generalities 664
16.7.2. Typologies of Eccentrically Braced Structures. 666
16.7.3. Behaviour of Dissipative Members 668
16.7.4. Classification of Dissipative Members. Behaviour Characteristics . 670
16.7.5. Plastic Strength of Dissipative Members 671
16.7.6. Stiffeners of Dissipative Members 671
16.7.7. Design Provisions 674

16.7.8. Aspects concerning co-operation between Dissipative Steel Members and Concrete Slab 680
16.7.9. Final Considerations concerning the Design of Eccentrically Braced Frames 681
16.8. Other Structures with Dissipative Characteristics 681
16.8.1. Structures with Dissipative Members extra-located on the Horizontal Beams 682
16.8.2. Other Applications of the Dissipative Members 684
16.8.3. Structures with infilled steel plate shearpanels 685
16.8.4. Structures with Semi-Rigid Connections 687
16.9. Conclusions concerning the Behaviour of Steel and Mixed Structures subjected to March 4-1977 Earthquake. 961
16.9.1. Multistorey Structures 691
16.9.2. Steel and mixed Plant Halls 692
16.10. Structural Systems. Members and Connections. Effective Lengths, Stabilysing Elements. Exemples of Structures located in Seismic Areas 693
16.10.1. Structures. Members and Connections 693
16.10.2. Effective Lengths. Stabilysing Elements 696
16.10.3. Steel structures designed and erected by Romanian Engineers . 699
16.11. Seismic design codes in various countries 699
16.11.1. Loads. Load combinations. Deflections and Drifts 699
16.11.2. Design of unbraced frames 716
16.11.3. Design of concentrically braced frames 722
16.11.4. Design of eccentrically braced frames 725
16.11.5. Behaviour of multi-storey steel frames during severe earthquakes
16.12. The analysis of steel structures subjected to seismic loads 727
16.12.1. The design method considering the elastic, static and dynamic behaviour 733
16.12.2. The design method considering the post-elastic static and dynamic behaviour of structures 734
16.12.3. The application of structural analysis methods· Exemples of designed and erected structures 735
References 741
Annexes 759

Partea I

COMPORTAREA METALELOR. MIJLOACE DE ASAMBLARE

1.

MATERIALE FOLOSITE LA REALIZAREA STRUCTURILOR METALICE

Materialul folosit în prezent la majoritatea construcțiilor metalice este oțelul. Încep să capete însă o aplicare tot mai largă aliajele de aluminiu, mai ales la elementele de închidere ale construcțiilor.

1.1. FONTA CA MATERIE SEMIFABRICATĂ PENTRU ELABORAREA OȚELULUI

Fonta este un aliaj al fierului cu carbonul în care conținutul de carbon este cuprins între 1,7% și 6,67% și servește ca materie primă pentru elaborarea oțelului. Materia primă pentru fabricarea fontei o constituie minereurile de fier.

Fonta se fabrică în cuptoare înalte, cu funcționare continuă, numite *furnale*, alcătuite dintr-o manta groasă de oțel căptușită la interior cu cărămidă refractară (fig. 1.1). Forma furnalului, cu secțiunea (circulară) variabilă pe înălțime, este impusă de procesele fizico-chimice care au loc în interior, cu modificare de volum datorită căldurii. Pentru fabricarea fontei se folosesc *minereuri de fier*, *combustibili* și *fondanți*.

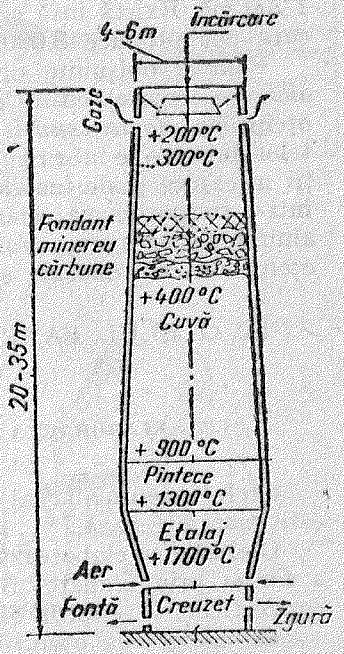


Fig. 1.1. Schema unui furnal.

Minereurile de fier cuprind partea utilă sub formă de oxizi și hidroxizi de fier și sterilul format din diferite amestecuri de alți oxizi și roci. După conținutul de fier minereurile se clasifică în: *minereuri bogate* care conțin peste 45% fier (magnetita, de culoare neagră, $\leqslant$ 75% Fe; hematita, de culoare roșie, 65% $\leqslant$ Fe; limonita de culoare galbenă, $\leqslant$60%Fe) și *minereuri sărace* care conțin sub 45% fier (siderita, de culoare alb-gălbuie, $\leqslant$40% Fe). Minereurile se introduc în furnal după ce în prealabil au fost supuse operațiunilor de sfărâmare, cernere, concentrare și aglomerare.

Combustibilul folosit la prepararea fontei este cocsul obținut prin distilarea cărbunilor naturali. Cocsul produce prin ardere căldura necesară topirii minereurilor, reduce oxizii de fier din minereuri și carburează fierul rămas liber, transformându-l în fontă.

Fondanții se adaugă în furnal pentru a ușura transformarea în zgură a rocilor din minereuri și a cenușii rezultate din ardere, precum și pentru a înlesni eliminarea unor impurități.

Combustibilul, minereurile și fondanții sunt introduși în furnal pe la partea superioară. Pe la partea inferioară a furnalului se suflă aer sub presiune care a fost încălzit în prealabil la o temperatură în jur de 900 °C, în instalații speciale denumite preîncălzitoare (caupere). Acestea sunt construcții cilindrice din tablă, cu ax vertical, care au interiorul umplut cu zidărie refractară așezată în formă de fagure. La un furnal sunt atașate patru preîncălzitoare care funcționează alternant: în timp ce două dintre ele sunt încălzite prin arderea gazelor calde ieșite de la furnal, celelalte două cedează căldura acumulată anterior aerului rece suflat cu presiune (2,5 . . .2,8 at) de suflante și dirijat către partea inferioară a furnalului.

Prin arderea cocsului se produce topirea materialelor și au loc o serie de reacții chimice: de reducere a oxizilor de fier (fierul este eliberat și se formează oxizii de carbon) și de carburare (fierul se combină cu carbonul rezultând carbura de fier Fe_3C numită și cementită).

Cementita se amestecă cu fierul și formează fonta care se adună în stare topită la partea de jos a furnalului (creuzet). Sterilul și cenușa din arderea cocsului se separă sub formă de zgură topită, care fiind mai ușoară se adună deasupra fontei. Fonta și zgura rezultate sunt evacuate pe măsura producerii lor.

Capacitatea maximă a furnalelor construite în țara noastră este de 1 700 m³. Există însă și furnale cu capacități mai mari (3 000—4 000 m³) care pot produce 8 000—10 000 t fontă pe zi.

Fontele obișnuite obținute în furnale sunt de două categorii: *fonta albă* (de afinare) cu un conținut bogat de cementită, folosită la fabricarea oțelurilor; *fonta cenușie*, utilizată ca semifabricat pentru elaborarea fontelor din care se fabrică prin turnare diferite piese de mașini, de construcții mecanice și de instalații sanitare. Fontele speciale (feroaliajele) conțin într-o proporție mai mare unul sau mai multe elemente de aliere: siliciu, aluminiu, mangan, crom, titan, molibden etc. și ser vesc la elaborarea oțelurilor ca adaosuri sau ca elemente de aliere.

1.2. OȚELUL. FABRICAREA OȚELULUI ȘI A PRODUSELOR DIN OȚEL

1.2.1. ELABORAREA OȚELURILOR CARBON ȘI A OȚELURILOR SLAB ALIATE

Oțelul este un aliaj al fierului cu carbonul în care conținutul de carbon este mai mic de 1,7%; oțelul are greutatea tehnică de 7850 daN/m³.

Oțelurile se elaborează prin reducerea conținutului de carbon (afinare) a fontei prin oxidare. Se folosesc următoarele moduri de elaborare: în convertizor, în cuptor Siemens-Martin și în cuptor electric.

La elaborarea oțelurilor slab aliate se introduc în convertizor sau în cuptor feroaliaje (fonte cu un conținut bogat de elemente de aliere) sau

diferite materiale de adaos în cantități necesare. Procesul de elaborare a oțelurilor are loc în oțelării.

O clasificare a procedeelor și agregatelor pentru elaborarea oțelurilor (fig. 1.2) cuprinde:

● *procedee de afinare cu oxigen* din care fac parte procedeul LD — LD.AC cu suflarea oxigenului pe la partea superioară și respectiv procedeele OBM/LWS cu suflarea oxigenului în baie pe la fund (specializate în producția de oțeluri speciale);

● *procedee de afinare cu vatră deschisă* în care intră cuptorul Siemens-Martin și cuptoarele electrice cu sau fără inducție.

Oțelăriile construite în ultimele decenii (printre care și cele de la Combinatele Siderurgice Galați și Călărași) folosesc convertizoare de tip L.D. (fig. 1.3).

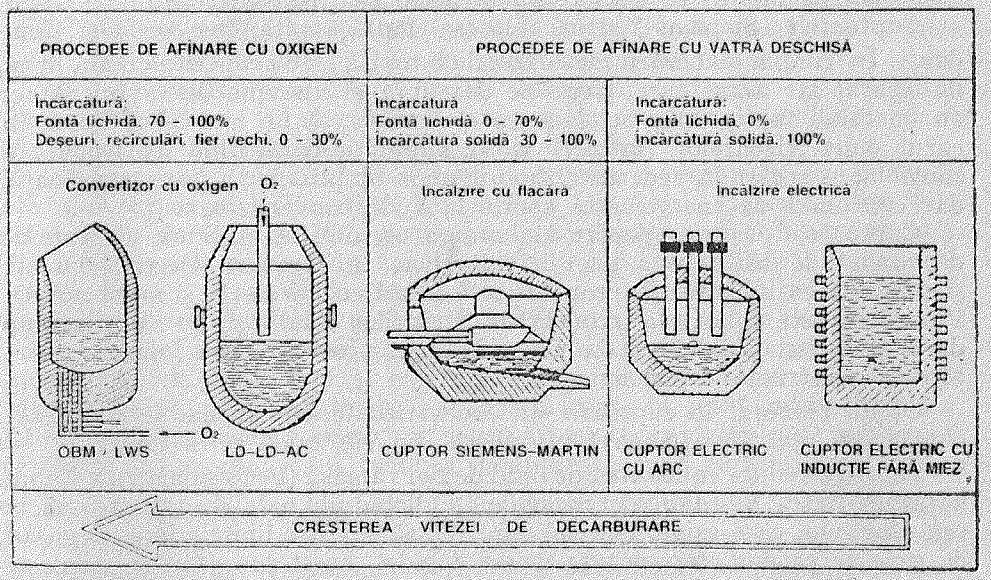


Fig. 1.2. Principalele agregate pentru elaborarea oțelului.

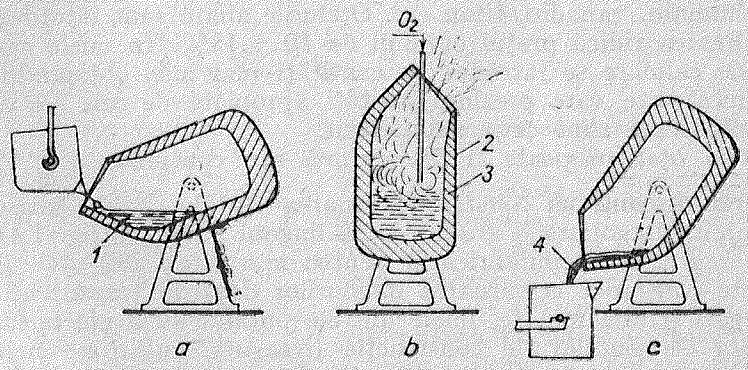


Fig. 1.3. Convertizor cu insuflare de oxigen:

a — încărcare; *b* — afinare; *c* — golire; *1* — fontă topită; *2* — manta metalică; *3* — căptușeală; *4* — oțel.

În aceste convertizoare căldura necesară procesului metalurgic de afinare provine din arderea (oxidarea) diferitelor elemente. Oxigenul este suflat pe la partea superioară a masei de metal topit prin intermediul unei țevi denumită lance, terminată cu un cap prevăzut cu mai multe orificii pentru ieșirea oxigenului.

Durata procesului de elaborare a unei șarje variază între 45 și 60 min. în funcție de marca oțelului.

În convertizoare se lucrează cu fontă lichidă, în care se poate adăuga până la 30% fier vechi. Lucrându-se cu oxigen și nu cu aer se realizează procente de azot foarte reduse (0,006%—0,008%).

Convertizorul cu oxigen, indiferent de varianta tehnologic-constructivă, este agregatul modern economic în care se elaborează oțeluri carbon și slab aliate, în producție de masă; astăzi peste 70% din producția mondială de oțeluri se elaborează în asemenea agregate.

Cuptoarele Siemens-Martin folosesc fontă topită, fier vechi și fondanți. În timpul elaborării masa metalică topită este acoperită cu un strat de zgură, iar aerul care trece pe deasupra ei nu vine direct în contact cu metalul topit, ceea ce face ca elaborarea să fie mai lentă decât în cazul convertizoarelor (între 4 și 12 ore); procesul fiind lent, poate fi controlat și reglat în vederea obținerii unor oțeluri de calitate superioară, dar consumul de energie este sporit față de convertizoare.

Cuptoarele electrice pentru elaborarea oțelului se clasifică, în funcție de modul de utilizare a energiei electrice, în cuptoare electrice cu arc și cuptoare cu inducție. Cuptorul funcționează cu fier vechi și fontă solidă. Procedeul este folosit la producerea oțelurilor aliate și este mai scump decât celelalte. Oțelurile elaborate prin acest procedeu sunt folosite mai ales în construcții de mașini.

Oțelul elaborat în cuptoare sau convertizoare este turnat în oale executate din oțel cu o cămașă interioară din cărămidă refractară.

Pentru a reduce cantitatea de oxid de fier rămasă (FeO) și pentru a îmbunătăți calitatea, se adaugă în masa de oțel lichid din oala de turnare siliciu sau aluminiu, care asigură ca solidificarea să se facă liniștit fără degajări de gaze ce produc efervescența masei lichide. Acest procedeu se numește *calmare* (dezoxidare). Pentru obținerea unor oțeluri cu caracteristici superioare de rezistență și tenacitate, calmarea se face cu siliciu și cu adaosuri de aluminiu, vanadiu, titan etc. Oțelurile aliate sunt întotdeauna calmate. Calmarea ridică prețul oțelului cu 10...15%. În unele cazuri elementele de calmare se introduc în cantități mai mici obținându-se oțelurile semicalmate, care prezintă calități apropiate de cele ale oțelurilor calmate, dar care sunt ceva mai ieftine.

Turnarea oțelului poate fi discontinuă sau continuă.

Turnarea discontinuă constă în turnarea oțelului lichid într-o formă (tipar) numită lingotieră și are ca produs lingoul. Lingoul (fig. 1.4), având 3...40 t, reprezintă semifabricatul pentru laminatele din oțel. Eventualele defecte care apar la turnarea lingourilor datorită turnării sau răcirii se pot regăsi și în laminate, unele din ele putând avea efecte defavorabile asupra elementelor de construcție (retasura, suflurile, incluziunile, fisurile, segregarea). Cu implicații calitative mari sunt:

● *Retasura* este un gol închis sau deschis la partea superioară a lingoului și este datorat faptului că metalul din interior se solidifică și își

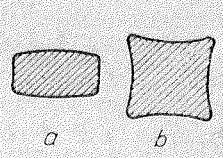


Fig. 1.4. Forme de secțiune transversală ale lingourilor:
a — lingou pentru table; *b* — lingou pentru profile.

Fig. 1.5. Retasură.

micșorează volumul într-un spațiu determinat de crusta exterioară (fig. 1.5). Retasura are uneori pereții oxidați și nu se sudează decât parțial la laminare, formând planuri de separare în piesele de oțel. Retasura este mult mai accentuată la oțelurile calmate decât la cele necalmate. Pentru a elimina acest defect, părțile cu retasuri trebuie tăiate (șutate).

● *Incluziunile* provin din bucăți de zgură, materiale refractare sau din unele elemente de aliere care se topesc incomplet; în cantitate mare ele reduc caracteristicile mecanice ale oțelului.

● *Segregarea* constă într-o neuniformitate a compoziției chimice a oțelului turnat și se datorește faptului că o serie de elemente care sunt solubile în fierul lichid (C, S, P) părăsesc zonele mai reci care se solidifică și se aglomerează în zonele centrale care se solidifică mai târziu.

Segregarea produsă în masa lingoului se numește *segregare zonală*, iar cea care se produce la nivelul cristalelor — *segregare cristalină*.

Segregarea zonală ducând la abateri mari ale compoziției chimice (uneori până la 200% și chiar mai mult) poate fi periculoasă la construcții sudate. La oțelurile necalmate segregarea apare în toată masa lingoului. La oțelurile calmate zonele cu segregări se concentrează la partea superioară a lingoului care trebuie îndepărtată prin șutare.

Metoda de turnare continuă constă din răcirea intensă a recipientului (cristalizatorului) în care se toarnă continuu oțel și din extragerea semifabricatului format pe măsura turnării și solidificării oțelului, după care continuă răcirea acestuia (fig. 1.6). Turnarea continuă se aplică numai oțelurilor calmate.

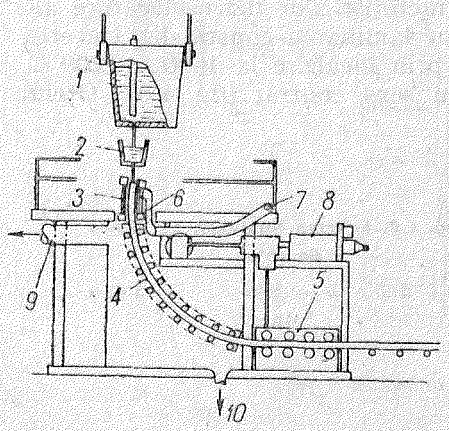


Fig. 1.6. Turnarea continuă (cu cristalizator curb) a oțelului:
1 — oală de turnare; *2* — oală intermediară; *3* — cristalizator curb; *4* — role pentru îndoirea oțelului; *5* — îndreptarea oțelului; *6* — suport radial cristalizator; *7* — pivotul suportului; *8* — sistem de acționare, cristalizare, extragere și îndreptare a oțelului; *9* — conducta de evacuare a aburului; *10* — evacuarea apei.

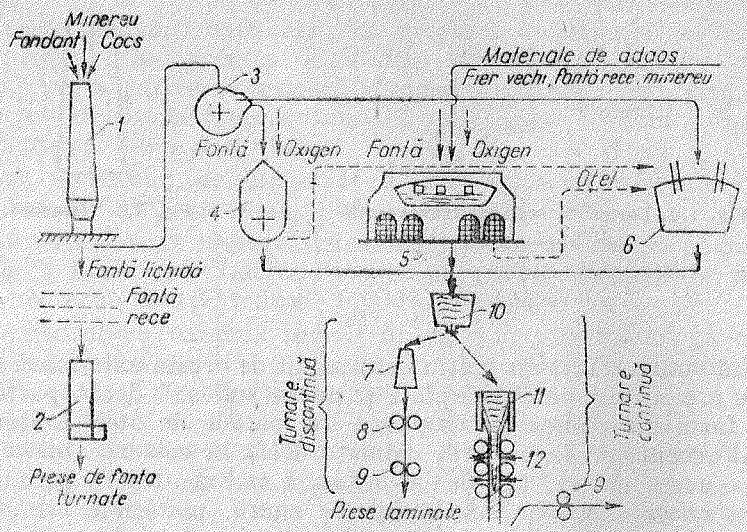


Fig. 1.7. Schema fabricării produselor din oțel:

1 — furnal; *2* — cubilou; *3* — melanjor; *4* — convertizor; *5* — cuptor Siemens—Martin; *6* — cuptor electric; *7* — lingou; *8* — laminor degrosisor; *9* — laminor finisor; *10* — oala de turnare; *11* — cristalizator; *12* — răcire.

Turnarea continuă prezintă avantajul de a realiza semifabricate apropiate ca dimensiuni de cele ale produselor finite, eliminându-se o serie de operațiuni intermediare de laminare pentru a reduce dimensiunile mari ale lingourilor.

În figura 1.7 se prezintă schema fabricării produselor din oțel.

1.2.2. FABRICAREA PRODUSELOR DIN OȚEL. LAMINAREA. ALTE PROCEDEE

1.2.2.1. **Laminarea. Produse laminate.** Produsele din oțel se obțin în general prin laminare. Laminarea se poate face la cald sau la rece, ultima variantă fiind aplicată tablelor sau platbandelor de grosime mică.

Prin laminare la cald se obține, pe de o parte, forma produsului, iar pe de altă parte, o îmbunătățire a caracteristicilor fizico-mecanice ale oțelului rezultat din turnare. În principiu laminarea constă din trecerea unei piese de oțel, adusă în stare plastică, prin încălzire la 1000...1200 °C, printre cilindri (valțuri) care se rotesc în sens contrar (fig. 1.8). Oțelul

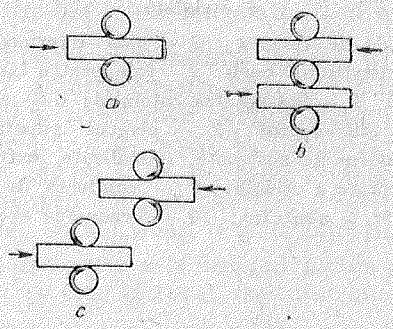


Fig. 1.8. Schema laminării și tipuri de caje:

a — duo; *b* — trio; *c* — dublu duo.

fiind moale își reduce grosimea inițială la mărimea determinată de distanța dintre cei doi cilindri. În timpul trecerii prin valțuri materialul este în principal alungit, deformația transversală fiind mică.

Piesa de oțel este trecută succesiv într-un sens sau altul printre cilindrii aceleiași caje sau printre cilindrii cajelor succesive ale liniilor. La fiecare trecere are loc o reducere a dimensiunilor secțiunii transversale a elementului primar. Pentru laminarea la forma finită, elementul trece prin mai multe linii de laminare. Deplasarea elementului se face pe căi cu role. Întrucât la diferitele treceri are loc o răcire a elementelor din oțel, acestea sunt reîncălzite în cuptoare speciale.

Într-o primă fază de laminare secțiunea lingourilor se reduce în laminoare degrosisoare. Din lingouri se laminează o serie de semifabricate, și anume: *blumurile* cu secțiunea pătrată ($a = 125 \ldots 450$ mm) servind la laminarea altor semifabricate; *bramele* cu secțiunea dreptunghiulară cu lățimi de 400...1600 mm și grosimi de 75...350 mm, servind la laminarea pieselor plate.

Blumurile și bramele se laminează în *laminoare bluming*. Laminarea unor lingouri mai grele de 7 t în brame se face în *laminoare slebing*. Din brame se laminează tablele groase, de dimensiuni plane mari. Din blumuri și brame se obțin în continuare semifabricate cum sunt țaglele cu diferite forme (pătrate, dreptunghiulare sau rotunde) servind la laminarea profilelor, platbandelor și țevilor; de asemenea se laminează platine cu secțiunea dreptunghiulară, dar cu dimensiuni mai reduse din care se fabrică tablele subțiri.

Laminarea produselor finite de diferite tipuri se face, pe același principiu, în laminoare finisoare (fig. 1.9).

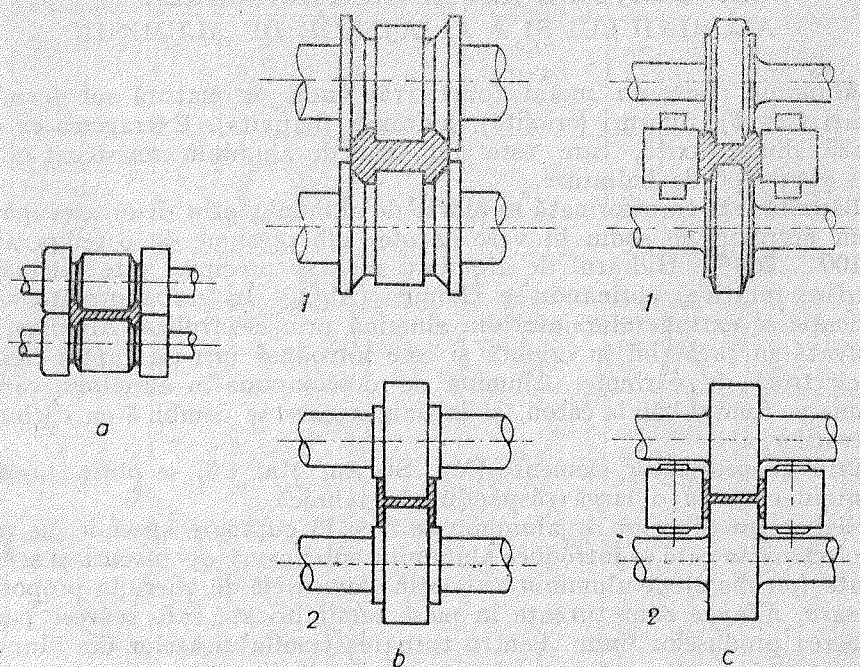


Fig. 1.9. Laminarea profilelor dublu T:

a — profile ușoare; *b*, *c* — profile grele; *1*, *2* — etape ale laminării.

Principalele produse laminate la cald, folosite la construcții metalice sunt date în tabelul 1.1.

Laminarea la rece se aplică benzilor laminate la cald. Prin laminarea la rece se obțin benzi cu grosimi mici (0,5 . . .3 mm) care prezintă o suprafață mult mai curată decât a laminatelor la cald (care păstrează după laminare o serie de oxizi imprimați pe fața metalului). Benzile laminate la rece se înfășoară în rulouri și se livrează ca atare.

1.2.2.2. **Alte procedee de fabricare a elementelor de construcții metalice.** Se menționează următoarele procedee:

Extrudarea constă din trecerea forțată a metalelor încălzite la temperaturi mari (aduse în stare plastică) prin matrițe speciale; în acest mod se pot fabrica profile deschise, țevi de diferite forme ale secțiunii transversale etc.

Tragerea constă din trecerea forțată a unui element de secțiune mică și lungime mare printr-un calibru fix cu secțiunea orificiului mai mică decât a elementului. Prin tragere se obțin țevi, profile cu secțiuni reduse, sârme etc.

Trefilarea reprezintă tragerea sârmelor. Tragerea și trefilarea efectuându-se la rece, piesele obținute prin aceste procedee au dimensiuni mai precise și fețele mai netede decât laminatele la cald.

Formarea la rece se folosește pentru elementele de construcție cu pereți subțiri, cu diferite forme ale secțiunii transversale.

1.3. ALIAJE DE ALUMINIU. FABRICAREA ALUMINIULUI ȘI A ALIAJELOR DE ALUMINIU

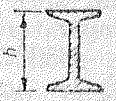
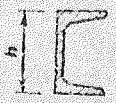
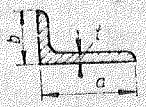
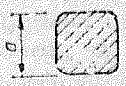
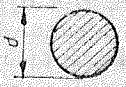
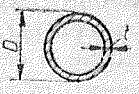
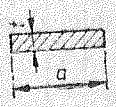
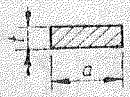
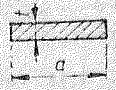
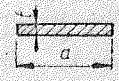
Aluminiul este un metal foarte răspândit în natură sub formă de silicați (argilă), fluoruri (criolită), hidroxizi (bauxită). Extragerea se efectuează din bauxită, care este un oxid de aluminiu amestecat cu alți oxizi și cu apă de hidratare.

Bauxita este transformată în hidrat de aluminiu prin dizolvarea bauxitei în hidroxid de sodiu în vase de oțel sub presiune, la o temperatură de 100 . . .200 °C. Hidratul de aluminiu care se precipită este calcinat în cuptoare rotative, obținându-se alumina (Al_2O_3). În etapa următoare de fabricație se extrage aluminiul din alumină prin electroliză. Alumina este dizolvată în prealabil în criolită și este introdusă într-un cuptor electric cu electrozi de cărbune. Alumina se descompune în aluminiu, care se depune pe fundul băii la catod, și în oxigen care se combină cu cărbunele electrozilor.

Prin adaosul altor elemente (Mg, Si, Zn, Mn, Cu) se obțin aliaje de aluminiu care au o largă răspândire în tehnică.

Elaborarea aliajelor de aluminiu se face în cuptoare speciale cu vatră sau electrice în care se introduce aluminiul sub formă de blocuri și semifabricate (prealiaje) de aluminiu ce conțin elementele de aliere în proporțiile necesare. Aliajele sunt turnate în piese semifabricate care servesc pentru obținerea produselor finite. Pentru turnarea semifabricatelor din aluminiu sunt folosite următoarele procedee: turnarea în lingotiere, turnarea semicontinuă, turnarea continuă care uneori este urmată de laminarea continuă; de asemenea se folosesc și procedee speciale.

Tabelul 1.1

Nr. crt.	Denumirea laminatului	Forma secțiunii	Lungimi de livrare [m]	Dimensiuni caracteristice	Calitatea oțelului	Standardul de produs
1	Oțel I		6...12	h=8... 40 cm	conform STAS 500/2-80	STAS 565-86
2	Oțel U		6...12	h=6,5... 30 cm	conform STAS 500/2-80	STAS 564-86
3	Oțel cornier cu aripi egale		4...12	t=4...16 a=20... 160 mm	conform STAS 500/2-80	STAS 424-86
4	Oțel cornier cu aripi neegale		4...12	t=8...9 a=80... 100 mm b=65...75	conform STAS 500/2-80	STAS 425-80
5	Oțel pătrat		2...6	a=8... 60 mm	conform STAS 500/2-80	STAS 334-88
6	Oțel rotund		2...6	d=10... 150 mm	conform STAS 500/2-80	STAS 333-87
7	Țevi din oțel fără sudură		4...12,5	t=3...22 D=25... 377 mm	conform STAS 8185-88	STAS 404/2-87
8	Bandă de oțel		Rulouri de 18... 100 kg	t=2...5 a=20... 370 mm	conform STAS 500/2-80	STAS 908-80
9	Oțel lat		3...12	t=5...50 a=20... 150 mm	conform STAS 500/2-80	STAS 395-88
10	Tablă groasă		4...12	t=3...150 a=1 000 ... 4 000 mm	conform STAS 500/2-80 și STAS 9021-89	STAS 437-87
11	Tablă striată		4...12	t=4...10 a=700... 1 500 mm	conform STAS 500/2-80	STAS 3480-80

Principalele procedee de prelucrare a semifabricatelor din aluminiu și din aliaje de aliminiu sunt laminarea (la cald sau la rece), extrudarea, tragerea și formarea la rece.

Aluminiul este un metal de culoare albă, cu o nuanță albăstruie, maleabil și ductil. În aer se acoperă cu un strat de oxid de aluminiu care-l protejează, împiedicând propagarea coroziunii spre interiorul piesei.

Greutatea tehnică a aluminiului la temperatura obișnuită este de 2700 daN/m^3. Temperatura de topire este de +658°C. Rezistența aluminiului la rupere este mică (circa 100 N/mm^2). De aceea nu este indicat a fi folosit în construcții nealiat, ci sub formă de aliaje, care au caracteristici mecanice superioare aluminiului pur.

1.4. STRUCTURA CRISTALINĂ A METALELOR

1.4.1. REȚEAUA CRITSTALINĂ. SISTEME DE CRISTALIAZRE

În stare solidă metalele prezintă o structură cristalină caracterizată prin așezarea ordonată a atomilor în spațiu, pe baza unor legi precise și caracteristice fiecărui metal sau aliaj. Aceste legi sunt concretizate în *sistemul de cristalizare* al substanței.

Un cristal este un grăunte metalic cu dimensiuni de ordinul sutimilor de mm, care se formează când atomii se dispun după o rețea spațială, având rolul unui sistem de coordonate tridimensional (fig. 1.10). În fiecare rețea cristalină un anumit grup fundamental de atomi se repetă indefinit după cele trei dimensiuni. Acest grup fundamental se denumește *celulă cristalină elementară*. Un cristal este constituit din o serie de reproduceri paralele ale acestei celule. În practică, se obișnuiește să se definească ansamblul cristalului în funcție de celula elementară.

Oțelul și aluminiul cristalizează în sistemul cubic, caracterizat prin două moduri de așezare a atomilor: sistemul cubic cu *volum centrat* (fig. 1.11, *a*), când atomii ocupă vârfurile și centrul cubului și sistemul cubic cu *fețe centrate*, când atomii ocupă vârfurile și centrele fețelor cubului (fig. 1.11, *b*).

Sistemul cubic cu volum centrat prezintă o așezare mai compactă a atomilor și, ca atare, interspațiile sunt mai mici decât în cazul sistemului cu fețe centrate.

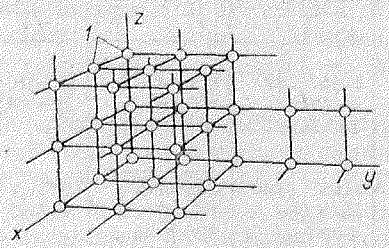


Fig. 1.10. Rețea spațială cubică simplă:
1 — nodurile rețelei.

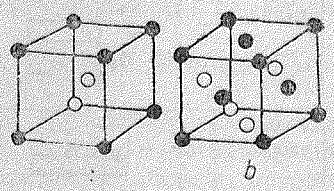


Fig. 1.11. Celulă elementară cubică:
a — sistem cubic cu volum centrat; *b* — sistem cubic cu fețe centrate.

Din punct de vedere fizic, coeziunea dintre atomii metalici este asigurată de forța de legătură. Această forță de coeziune, numită și legătură metalică, se poate explica prin faptul că fiecare atom metalic din rețea cedează aproximativ un electron din pătura exterioară de electroni și prin aceasta se încarcă pozitiv, devenind un ion pozitiv. Electronii cedați pot să se miște liber între ioni, formând gazul electronic, care într-o anumită măsură acționează ca liant ce menține legătura dintre ioni (fig. 1.12). Sistemul cristalin imaginat a fi format din atomi este de fapt format din ioni și din gazul electronic.

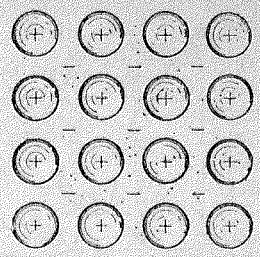


Fig. 1.12. Reprezentarea schematică a legăturii metalice:
(+) ioni pozitivi; (—) gaz electronic negativ.

1.4.2. CRISTALIZAREA PRIMARĂ. TRANSFORMĂRILE ALOTROPICE ALE FIERULUI

Trecerea din stare lichidă în stare solidă prin cristalizare se produce la o anumită temperatură, proprie fiecărui metal. Pentru a avea loc cristalizarea este necesară o subrăcire, adică o scădere a temperaturii sub temperatura teoretică de cristalizare.

Procesul de cristalizare începe prin formarea în diferite puncte din metalul lichid a unor particule solide cristaline, numite *centre de cristalizare*. Pe măsura scăderii temperaturii, cristalele se măresc și apar noi centre de cristalizare (fig. 1.13).

Când numărul centrelor de cristalizare este redus, cristalele formate se pot dezvolta relativ mult. Dacă numărul centrelor de cristalizare este mare, cristalele se împiedică reciproc în dezvoltarea lor și oțelul rezultat are o granulație fină, prezentând avantaje deosebite din punctul de vedere al proprietăților mecanice. Pentru a mări numărul centrelor de cristalizare trebuie produsă o subrăcire mare, care mărește viteza de apariție a centrelor de cristalizare, micșorând pe aceea de dezvoltare a cristalelor.

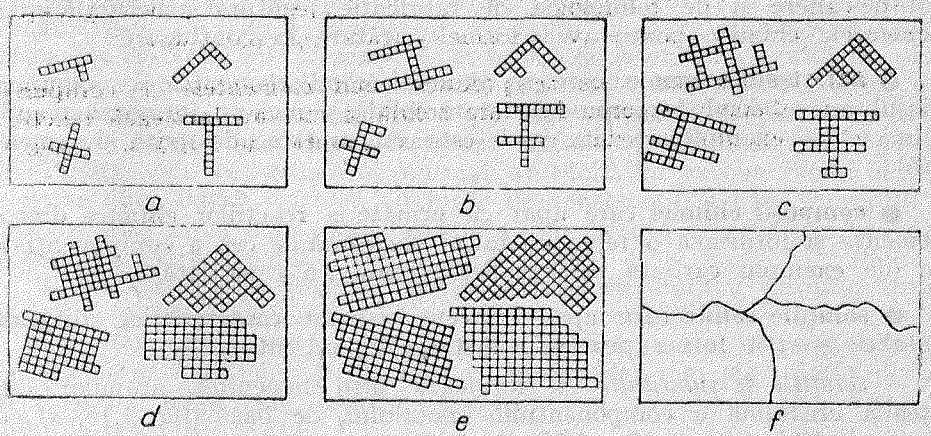


Fig. 1.13. Reprezentarea schematică a solidificării unui metal topit:
a . . . *f* — fazele solidificării.

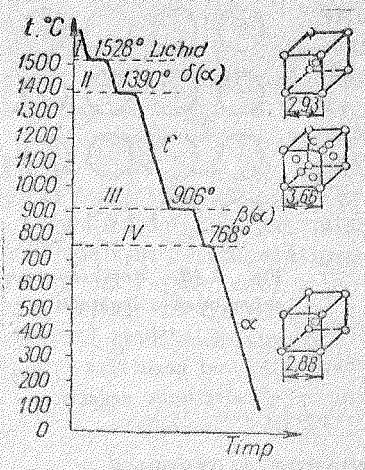


Fig. 1.14. Curba de cristalizare a fierului la răcire.

Mărirea numărului de centre de cristalizare se poate produce de asemenea prin existența în masa oțelului topit a unor carburi sau nitruri (compuși ai carbonului și azotului cu diferite elemente de aliere, cum sunt cromul, molibdenul, aluminiul, vanadiul); acestea se găsesc uniform repartizate în masa oțelului lichid sub formă de particule fine și constituie centre de cristalizare, care duc la formarea unei granulații fine.

În stare solidă un metal poate cristaliza în diferite sisteme cristaline în funcție de temperatură sau alți factori. Această proprietate se numește *alotropie* sau *polimorfism*. Trecerea de la o stare alotropică la alta ($\alpha \rightarrow \beta, \beta \rightarrow \gamma, \gamma \rightarrow \delta$) datorită temperaturii, are loc la temperatura de transformare alotropică.

Stările alotropice ale fierului sunt prezentate în figura 1.14 în care sunt arătate și sistemele de cristalizare. Prezintă interes fierul γ care cristalizează în sistemul cu fețe centrate (906...1390 °C) și fierul α întâlnit la temperatura de exploatare.

1.5. STRUCTURA ALIAJELOR METALICE

1.5.1. TIPURI DE ALIAJE

Fierul și aluminiul se aliază cu diferite elemente care, adăugate în proporții corespunzătoare, le conferă anumite proprietăți.

Gradul de aliere se controlează la elaborare și se realizează prin adaosuri de elemente de aliere (feroaliaje, respectiv aliaje). În funcție de gradul de aliere și de tehnologia de fabricație, legătura structurală între elementele chimice poate avea formele arătate în continuare:

● **amestecul mecanic** care se produce când elementele ce compun aliajul nu se dizolvă reciproc în stare solidă și nici nu formează reacții chimice (de exemplu, perlita care este un amestec de ferită și cementită);

● **compușii chimici** care apar ca urmare a reacțiilor chimice dintre elemente și formează o rețea cristalină deosebită de cea a componenților lor (de exemplu carbura de fier Fe_3C, denumită cementită);

● **soluțiile solide** care apar frecvent și sunt caracteristice aliajelor metalice se pot forma prin substituție sau prin interstiție:

— *soluțiile de substituție* se formează prin înlocuirea atomilor din rețeaua cristalină a componentului (metalului) de bază (fig. 1.15, *a*) cu atomi ai altui element (fig. 1.15, *b*). Pentru formarea unei astfel de soluții este necesar ca razele atomice ale celor două elemente să fie aproape egale (fig. 1.16);

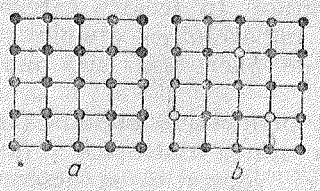


Fig. 1.15. Formarea soluției solide de substituție:
a — metalul de bază; *b* — soluție solidă.

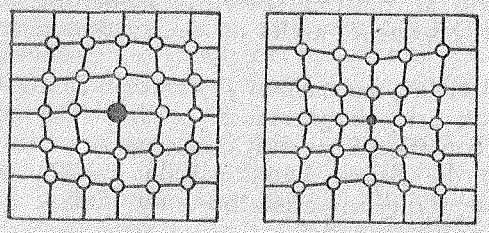


Fig. 1.16. Deranjarea rețelei la formarea soluției de substituție.

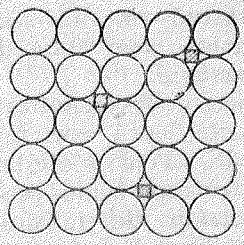


Fig. 1.17. Soluție solidă de interstiție.

— *soluția de interstiție* (pătrundere) se formează prin pătrunderea atomilor elementului care se dizolvă, în golurile rețelei cristaline a metalului de bază (fig. 1.17). Este necesar ca atomii elementului care se dizolvă să aibă raze suficient de mici ca să poată începea în golurile rețelei cristaline a componentului de bază (0,59 din raza atomului din metalul de bază). Pot pătrunde în golurile rețelei și unii atomi cu raze mai mari, dar în acest caz se produce o deranjare a rețelei, iar aliajul nu este ntotdeauna stabil.

1.5.2. STRUCTURA OȚELURILOR CARBON ȘI A OȚELURILOR SLAB ALIATE

Constituentul de bază al oțelului la temperatura ambiantă este fierul α, denumit și *ferită*. Rețeaua feritei prezintă goluri al căror diametru maxim este de 0,38 Å, diametrul atomului de carbon fiind de 1,54 Å. Deoarece carbonul nu formează decât soluții de interstiție, rezultă că, practic la temperatura ambiantă carbonul apare în oțel sub forma unui compus chimic Fe_3C, numit *carbură de fier* sau *cementită*. O parte cementită împreună cu șase părți ferită formează un amestec mecanic numit *perlită*.

Perlita este constituentul normal al oțelurilor carbon răcite încet și conține circa 0,85% carbon. Oțelurile de construcții la care procentul de carbon este circa 0,2% sunt alcătuite din perlită și ferită în proporții corespunzătoare fiecărui tip de oțel.

Ferita este moale, plastică, iar cementita este dură și casantă. Perlita ocupă o poziție intermediară între ferită și cementită.

În oțelurile carbon la temperatura obișnuită se mai găsesc și elemente cu diametre mai mici decât ale carbonului, dar mai mari decât diametrul golului (cum sunt fosforul, hidrogenul și azotul, pătrunse forțat în golurile rețelei).

Soluțiile de interstiție, la care rețeaua este deformată prin pătrunderea unor elemente cu diametrul mai mare decât al golului, sunt de cele mai multe ori soluții instabile care se pot descompune producând modifi-

cări ale caracteristicilor mecanice ale oțelurilor. În această categorie intră carbonul (C) și azotul (N_2) care produc îmbătrânirea oțelului.

În oțelurile slab aliate, elementele de aliere apar sub una din formele arătate la § 1.5.1.

La temperaturi ridicate, la care au loc prelucrările oțelului (laminarea, forjarea), fierul din aliaj se găsește în starea alotropică γ (austenită). La temperatura de formare a austenitei, cementita se descompune în ferită și carbon, iar carbonul se dizolvă în ferită. Fierul γ, care la această temperatură este în stare moale și plastică, prezintă goluri ale rețelei de diametru mai mare decât al fierului α, astfel că se pot forma soluții de interstiție.

Procesul de cristalizare al aliajelor fier-carbon în condiții de încălzire sau răcire lentă este reprezentat prin diagrama de echilibru fier-carbon (fig. 1.18). Pentru oțelurile de construcții prezintă interes zona din diagramă corespunzând procentelor de carbon până la 0,25 . . .0,30.

Domeniile de transformare ale structurii cristaline sunt delimitate de curbele (limite) de transformare în stare solidă.

Temperaturile corespunzătoare liniei PS sub care fierul se găsește numai sub formă de fier α se notează cu A_1, iar cele corespunzătoare curbei GS deasupra căreia fierul se găsește sub formă de fier γ se notează cu A_3. Punctele A_1 și A_3 de pe curbele corespunzătoare sunt cunoscute sub denumirea de *punct critic inferior*, respectiv *punct critic superior*. Intervalele de temperaturi cuprinse între punctele A_1 și A_3 se numesc *intervale de transformare*.

La oțelurile de construcții care au procente mici de carbon (în jurul a 0,2%), apare mai întâi un amestec de ferită și austenită care în final, prin transformarea austenitei în perlită, conduce la un amestec de perlită și ferită.

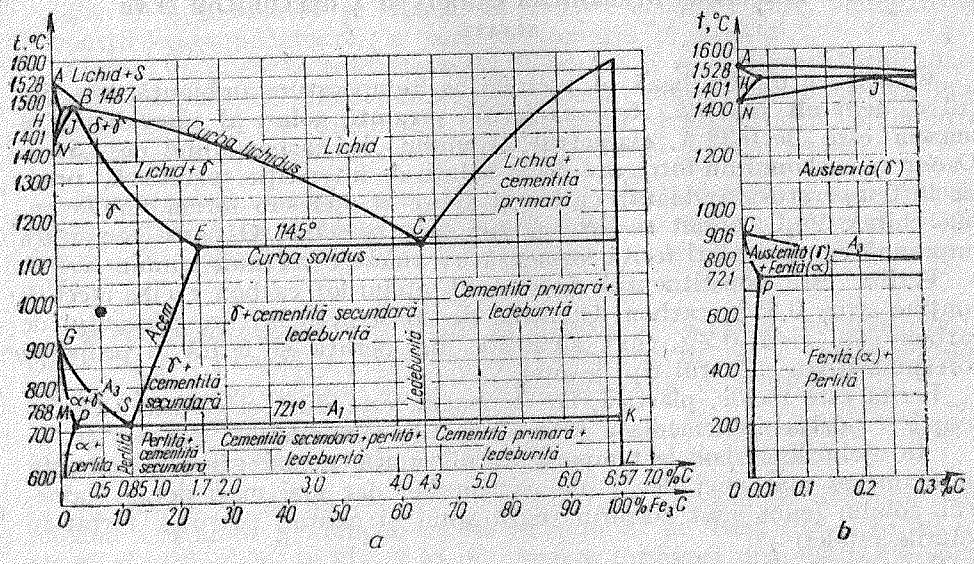


Fig. 1.18. Diagrama fier-carbon:

a — generală; *b* — zona oțelurilor pentru construcții metalice.

Transformările sunt reversibile şi corespund unor viteze de răcire sau de încălzire lente. Transformările structurale apar la elaborarea oţelului, la laminare şi la tratamente termice; ele apar de asemenea şi la sudarea pieselor de oţel şi determină proprietăţile şi comportarea oţelului în construcţii.

Transformarea perlito-austenitică şi respectiv austenito-perlitică se produce în modul următor:

— la ridicarea temperaturii peste A_1 începe transformarea feritei în austenită; peste A_3 structura este integral austenitică dizolvând carbonul. La coborârea temperaturii fenomenul este reversibil; sub A_1 structura redevine feritică, carbonul regăsindu-se sub forma de cementită, respectiv perlită.

Ca atare oţelurile pentru construcţii (la temperatura de exploatare) sunt formate din ferită şi perlită, având deci o structură ferito-perlitică. Această structură apare atât la oţelurile realizate cu puţin carbon, cât şi la oţelurile slab aliate în cazul când acestea nu sunt tratate termic sau sunt supuse unui tratament termic de normalizare.

Corespunzător diferitelor temperaturi la care are loc răcirea, din descompunerea austenitei apar diferiţi constituenţi (perlită, sorbită, troostită). Aceştia au în general structura cu atât mai fină cu cât temperatura de răcire este mai coborâtă, respectiv cu cât viteza de răcire este mai mare.

La o viteză de răcire mare, corespunzând unei temperaturi de răcire de 400 °C, apare constituentul denumit *bainită*. Bainita este compusă din ferită şi cementită, dar datorită vitezei mari de răcire, cementita nu se poate forma imediat după răcire. Rezultă o ferită puternic saturată cu carbon, din care mai târziu se separă carbonul sub formă de carbură de fier; bainita are o structură aciculară şi este mai dură decât constituenţii anteriori având proprietăţi plastice mai reduse.

La temperatura de 250...300 °C nu se mai pot produce formări de carburi (Fe_3C). Austenita trece în ferită înglobând în reţea atomii de carbon în soluţie suprasaturată şi formează constituentul denumit *martensită*. Acesta cristalizează în sistemul tetragonal cu volum centrat. Cristalele de martensită sunt aciculare şi apar în structură amestecate cu ferita. Celula martensitei este mai mare decât a feritei (fig. 1.19, *b*). Martensita este foarte dură, are rezistenţe mari şi este fragilă.

Formarea martensitei este posibilă dacă răcirea se face cu o viteză mai mare decât o anumită viteză denumită critică. Viteza critică este cu atât mai mică cu cât conţinutul de carbon este mai mare. Pentru oţelurile cu un conţinut redus de carbon (până la 0,3%), martensita se produce mai rar. Introducerea unor elemente de aliere reduce viteza critică pentru acelaşi conţinut de carbon.

La răcirea oţelurilor mai pot apărea şi alte structuri defavorabile pentru comportarea oţelului în construcţii datorită caracterului lor fragil.

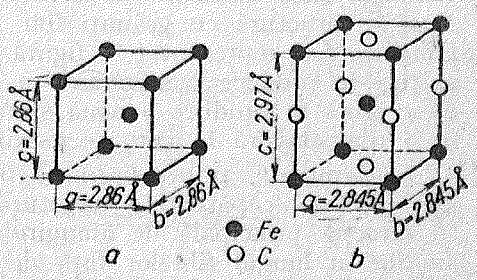


Fig. 1.19. Celula elementară:
a — a fierului; *b* — a martensitei.

Structura Wiedmannstätten este caracteristică oțelurilor turnate și structurii îmbinărilor sudate și apare în cazul când dintr-o cauză oarecare eräuntele de austenită a fost prea mare, sau a avut loc o supraîncălzire a elementului sau îmbinării. De regulă prin încălzire la temperaturi prea mari se formează cristale grosolane. Același fenomen se produce și când are loc o încălzire prelungită.

Fragilitatea se datorește faptului că ferita se formează sub formă de ace și plăci intrând în lamelele de perlită.

În cazul oțelurilor cu puțin carbon (0,02 . . .0,2%), la o răcire foarte lentă lamelele de ferită ale perlitei cristalizează pe cristalele primare de ferită, care se găsesc în exces, iar cementita din perlită se separă în rețea la limitele grăunților de ferită. Această cementită structural liberă (care nu formează perlită) este denumită *cementită terțiară*.

1.5.3. RECRISTALIZAREA. STRUCTURI DE LAMINARE

Datorită diferitelor acțiuni mecanice care produc deformații plastice la rece, metalul suferă unele deformări ale rețelei sau ale cristalelor ; acestea se manifestă prin mărirea durității, a rezistenței la rupere, a limitei la curgere și prin reducerea plasticității. Dacă metalul este încălzit are loc un proces de refacere a rețelei și a cristalelor.

Recristalizarea este procesul de refacere a cristalelor unui metal sau unui aliaj metalic, care a suferit deformări ale rețelei cristaline și deformații puternice ale grăunților, datorate unor deformații plastice la rece. Recristalizarea se poate produce la o anumită temperatură (temperatura de recristalizare), care este în funcție de compoziția chimică a aliajului, de gradul de deformare a rețelei și a cristalelor. Pentru oțelurile carbon, recristalizarea începe de obicei în jurul temperaturii de +550°C.

Temperatura de recristalizare este cu atât mai joasă cu cât deformarea anterioară a fost mai puternică, deoarece cristalele deformate formează noi centre de recristalizare, iar existența unui număr mare de centre conduce la creșterea uniformă a cristalelor și la o granulație fină a oțelului.

Recristalizarea propriu-zisă se produce până la temperatura de pe curba A_3, după care se obține transformarea austenitică totală.

Prelucrarea la cald a metalelor, precum și majoritatea tratamentelor termice au loc la temperaturi deasupra temperaturii de recristalizare. În cazul prelucrării prin deformare plastică la cald, structura metalului este sensibil modificată, producându-se o compactare a materialului. Prin *laminare* sunt anihilate structurile cu grăunți grosolani, și se obține în final o structură cu grăunți fini. Procesul de finisare al grăuntelui prin laminare este reprezentat în figura 1.20. La diferite treceri succesive prin valțuri se produce o sfărâmare a grăunților care, datorită temperaturii, cresc până se produce o nouă sfărâmare a lor. Laminarea trebuie oprită la o temperatură la care recristalizarea să se poată încă produce.

La laminare, prin deformare plastică, coroiajul (gradul de îndesare) crește, oțelul căpătând o structură fibroasă, cu direcția fibrelor dirijată în direcția principală de alungire (fig. 1.21). Metalul capătă proprietăți diferite în lungul fibrelor față de cele transversal pe fibre. Incluziunile nemetalice din masa oțelului capătă și ele o așezare în lungul laminării. Segregarea zonală, specifică oțelurilor necalmate, se deformează o dată

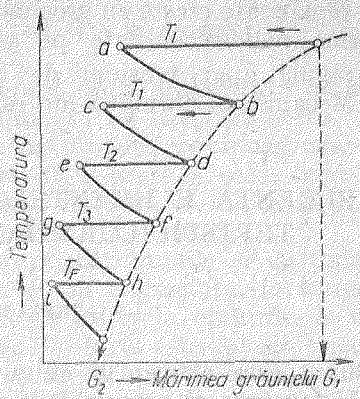


Fig. 1.20. Reprezentarea schematică a modului de finisare a grăuntelui de laminare:

G_1 — mărimea inițială a grăuntelui; G_2 — mărimea finală a grăuntelui.

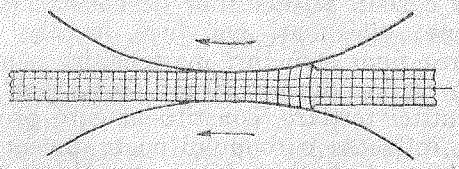


Fig. 1.21. Schema îndesării și orientării cristalelor datorită laminării.

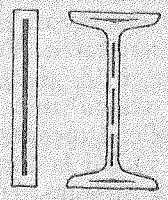


Fig. 1.22. Segregarea zonală în elementele laminate.

cu oțelul, concentrându-se în zona centrală a laminatului (fig. 1.22). Aceste fenomene fac ca metalul să capete proprietăți mecanice diferite pe cele două direcții; alungirile la rupere sunt în general mai mari în lungul laminării.

Caracteristicile mecanice, în special limita de curgere, sunt cu atât mai mari cu cât laminatele sunt mai subțiri. Aceasta se datorează trecerilor repetate printre cilindrii care asigură o îndesare mai bună a fibrelor metalice.

La laminare se pot produce și defecte, denumite *suprapuneri*, care apar atunci când o parte a metalului este îndoită și presată pe o suprafață vecină, de care nu se sudează deoarece fețele suprapuse sunt oxidate (fig. 1.23).

La răcirea neuniformă a laminatelor apar tensiuni remanente. Repartizarea lor este funcție de forma laminatului (fig. 1.24). Mărimea ten-

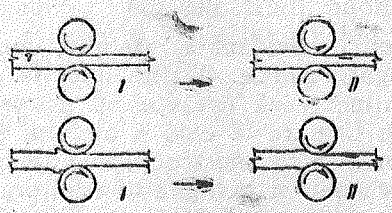


Fig. 1.23. Defectul de suprapunere datorat laminării.

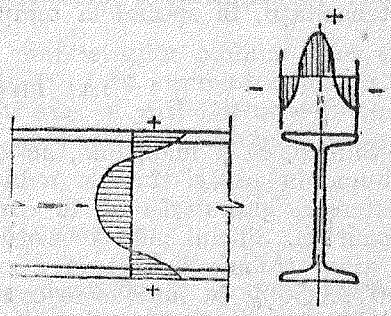


Fig. 1.24. Tensiuni remanente provenite din răcire într-un profil laminat.

siunilor remanente crește cu grosimea produsului laminat, datorită răcirilor neuniforme mai accentuate pe grosime.

De regulă apar tensiuni de întindere în zonele care se răcesc mai târziu. Mecanismul formării lor este arătat la § 4.9.2.

1.6. INFLUENȚA ELEMENTELOR DE ALIERE ASUPRA CARACTERISTICILOR MECANICE ALE OȚELULUI

1.6.1. INFLUENȚA CARBONULUI

Carbonul este elementul chimic care influențează într-o măsură importantă structura și proprietățile oțelului. Creșterea conținutului de carbon are efecte favorabile asupra proprietăților de rezistență, însă îi reduce sensibil tenacitatea. Conținutul de carbon al oțelurilor de construcții variază între 0,15 și 0,25%. Procente mai mari pot duce, în cazul unei răciri cu viteză mare, la formarea unor structuri martensitice sau bainitice fragile. Procentele reduse de carbon (între 0,10 și 0,14%) pot duce în timpul răcirii la formarea cementitei terțiare, constituent care produce fragilizarea oțelului. În consecință, influența carbonului poate deveni defavorabilă la prelucrările termice ale unui element de construcție metalică și în special în cazul sudării acestuia.

1.6.2. INFLUENȚA MANGANULUI

Manganul acționează ca un dezoxidant puternic al oțelului și contribuie la finisarea granulației; ca element de aliere îmbunătățește proprietățile mecanice ale oțelului, mărindu-i rezistența și tenacitatea. Manganul este principalul element de aliere a oțelurilor slab aliate folosite la structuri metalice. Manganul mărește călibilitatea oțelului, favorizând apariția bainitei în structură; de aceea, la oțelurile pentru construcții sudate, conținutul său este limitat la 1,7...1,8%. În comparație cu carbonul, puterea de călire a manganului este de circa 5—6 ori mai mică. Rezultă deci că este de preferat să se îmbunătățească proprietățile de rezistentă ale oțelurilor, folosind în locul carbonului un conținut mai ridicat de mangan. O creștere a raportului între conținutul de mangan și cel de carbon, în condițiile obținerii aceleiași rezistențe la rupere, are ca efect o mărire a tenacității, în special la temperaturi negative.

1.6.3. INFLUENȚA SILICIULUI

Siliciul, ca și manganul, acționează ca un dezoxidant al oțelului, contribuind în același timp la reducerea segregării zonale. Siliciul duce la o creștere a granulației și, în consecință, influențează defavorabil asupra tenacității. Siliciul mărește sensibilitatea de fisurare la cald a oțelului și ca atare trebuie limitat în cazul oțelurilor pentru construcții sudate la 0,40...0,50%, în funcție de conținutul în carbon și mangan al acestora. Excepție fac unele oțeluri slab aliate cu mangan și siliciu la care conținutul de siliciu poate ajunge până la 1%.

1.6.4. INFLUENȚA SULFULUI ȘI A FOSFORULUI

Sulful și fosforul pot fi considerate drept impurități dăunătoare în oțel și, ca atare, conținutul lor trebuie să fie cât mai redus.

Sulful formează cu diferite elemente din oțel compuși, care au punctele de topire joase, mărind sensibilitatea de fisurare la cald, ceea ce devine periculos în cazul sudurilor. Conținutul de sulf se limitează la 0,040...0,055%, în funcție de clasa de calitate a oțelului.

Fosforul formează structuri cu proprietăți fragile și cu tenacitate redusă; fosforul favorizează segregația și, în consecință, formarea structurilor în benzi la laminare. Conținutul de fosfor la oțelurile de construcții sudate este limitat la 0,040...0,055%. Fosforul este folosit uneori ca element de aliere, împreună cu alte elemente (cupru și crom) pentru elaborarea unor oțeluri rezistente la coroziune sau la abraziune. În acest caz, conținutul de fosfor poate ajunge până la 0,15...0,20%.

1.6.5. INFLUENȚA OXIGENULUI ȘI A HIDROGENULUI

Oxigenul și hidrogenul au efecte defavorabile asupra proprietăților oțelului.

Oxigenul se găsește în oțel sub formă de oxid de fier (FeO); datorită așezării acestuia la periferia grăunților, favorizează apariția ruperii intergranulare, reducând tenacitatea oțelului. Influența defavorabilă a oxigenului poate fi redusă prin formarea unor compuși chimici cu manganul și siliciul; pe această proprietate se bazează calmarea oțelurilor prin adaos de siliciu.

Hidrogenul produce de asemenea fragilitatea oțelurilor. Hidrogenul atomic pătrunde în rețeaua cristalină, unde are tendința să se aglomereze în zone de concentrare mare. Acest fenomen se produce cu creștere de volum, ceea ce duce la deformarea puternică a rețelei și la apariția unor fisuri. După aspect, ele sunt denumite: *fulgi* (când apar în oțel) și *ochi de pește* (când apar în suduri).

1.6.6. INFLUENȚA AZOTULUI

Prezența azotului în oțeluri poate fi sub formă de element liber sau de compuși chimici. Azotul liber reduce tenacitatea, precipitând în nitruri și carbonitruri în zona dintre rosturile cristalelor, ceea ce reduce capacitatea de deformare plastică a oțelului; fenomenul este denumit *îmbătrânire*.

Azotul acționează favorabil asupra proprietăților oțelului dacă se găsește sub formă de nitruri sau carbonitruri cu anumite elemente: aluminiu, vanadiu, titan, niobiu etc. Nitrurile și carbonitrurile fin dispersate în masa oțelului lichid (denumite *dispersoizi*) duc la finisarea granulației oțelului.

1.6.7. INFLUENȚA ALUMINIULUI

Aluminiul are o puternică acțiune dezoxidantă asupra oțelului. Se folosește la calmare unde, alături de siliciu, realizează o dezoxidare suplimentară a oțelurilor, conducând în final prin dispersoizii creați la o granulație fină a oțelului (oțel calmat suplimentar).

1.6.8. INFLUENȚA VANADIULUI, TITANULUI ȘI NIOBIULUI

Aceste elemente contribuie la obținerea unei granulații fine și uniforme. Procentele în care se găsesc în oțel sunt relativ mici 0,05...0,2% pentru vanadiu și 0,02...0,05% pentru titan și niobiu. Acestea au tendința de a forma compuși chimici cu carbonul și azotul (sub formă de carburi și carbonitruri) și aliaje cu ferita. Carburile și carbonitrurile fin dispersate în masa oțelului formează numeroase centre de cristalizare și produc finisarea granulației cu efecte favorabile asupra caracteristicilor de rezistență (în special asupra limitei de curgere) și a tenacității la temperaturi coborâte. De regulă, introducerea acestor elemente se face numai în oțelurile calmate.

Granulația fină obținută prin adaosurile de vanadiu, titan și niobiu micșorează călibilitatea oțelului. Oțelurile cu vanadiu prezintă însă o sensibilitate la supraîncălzire, prin creșterea granulației; ca atare la oțelurile pentru construcții sudate conținutul în vanadiu se limitează la 0,15%.

1.6.9. INFLUENȚA NICHELULUI

Nichelul este folosit ca element de aliere pentru diferite tipuri de oțeluri. În procente relativ reduse (sub 0,8%) influențează favorabil asupra proprietăților mecanice ale oțelurilor, datorită alierii cu ferita în soluții de substituție; realizează o îmbunătățire a călibilității.

Nichelul, în proporție de 0,4...0,5%, mărește rezistența la coroziune a oțelurilor. În procente mai mari (3...5%) nichelul este folosit la obținerea unor oțeluri tenace la temperaturi coborâte. Oțelurile aliate cu până la 9% nichel servesc la construirea rezervoarelor de presiune pentru produse criogene (gaze lichefiate la temperaturi joase între — 100 și —200°C). La minatele din aceste oțeluri sunt supuse unui tratament termic de îmbunătățire și pot fi sudate cu anumite măsuri speciale.

1.6.10. INFLUENȚA CUPRULUI

Cuprul în cantitate de 0,2...0,6% mărește rezistența oțelurilor la coroziunea atmosferică, fiind folosit împreună cu fosforul și cromul la elaborarea oțelurilor RCA și RCB (v. § 1.8.2.). Se recomandă ca la oțelurile pentru construcții sudate cuprul să nu depășească procentul de 0,4%, deoarece poate apare o tendință de fragilizare și de fisurare la cald.

Introducerea în oțel a elementelor de aliere conduce la modificarea sensibilă a proprietăților fizico-chimice ale acestuia. Astfel, pentru aprecierea rezistenței la rupere prin tracțiune (R_m) se poate utiliza cu suficientă exactitate următoarea relație empirică:

$$R_m = 25 + 61 \cdot P\% - 4 \cdot S\% + (51 + 37 \cdot Mn\%) \cdot C\% + (36 - 15 \cdot Mn\%) \cdot (Si\%)^2 + 6{,}2 \cdot Cr\% + 4{,}4 \cdot Ni\% + 36 \cdot Mo\%,$$

din care R_m rezultă în kgf/mm^2.

1.7. TRATAMENTELE TERMICE ALE OȚELURILOR

1.7.1. ROLUL TRATAMENTELOR TERMICE

Tratamentele termice ale metalelor au scopul de a modifica, în măsura dorită, structura și proprietățile acestora. Un tratament termic constă din încălzirea la o anumită temperatură a metalului, urmată de răcire (ambele controlate).

Regimul de tratament termic este determinat de următorii parametri principali (fig. 1.25): temperatura maximă la care a fost încălzit aliajul în timpul tratamentului termic t_i, durata de menținere la temperatura de tratament termic τ_i, viteza de încălzire și viteza de răcire; vitezele de încălzire și răcire pot fi constante sau variabile.

Încălzirea elementelor supuse tratamentelor termice se face în cuptoare de dimensiuni corespunzătoare, care asigură o încălzire controlată și uniformă a acestora.

1.7.2. TRATAMENTE TERMICE APLICATE ELEMENTELOR DIN OȚEL

1.7.2.1. **Recoacerea. Normalizarea.** Recoacerea este un tratament termic care are drept scop să dirijeze transformările în stare solidă.

După scopul pentru care se aplică, recoacerea se efectuează în condiții diferite de temperatură și timp, fenomenul purtând diferite denumiri și având diferite intervale ale temperaturilor de încălzire (fig. 1.26).

● **Recoacerea de omogenizare** ($t_i = 1\,050 \ldots 1\,150\,°C$) are drept scop o repartizare uniformă a diferitelor elemente de aliere în masa oțelului, conducând la înlăturarea segregării și la o omogenizare chimică a oțelului.

● **Recoacerea de detensionare** ($t_i = 400 \ldots 600\,°C$) are drept scop înlăturarea tensiunilor interne care apar în elementele metalice la prelucrările la cald sau la rece.

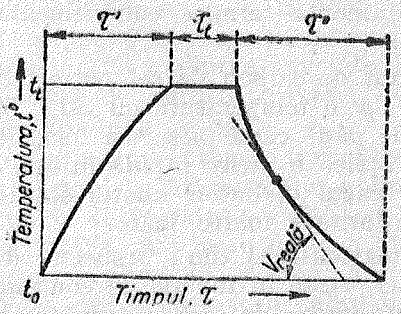


Fig. 1.25. Curba de tratament termic.

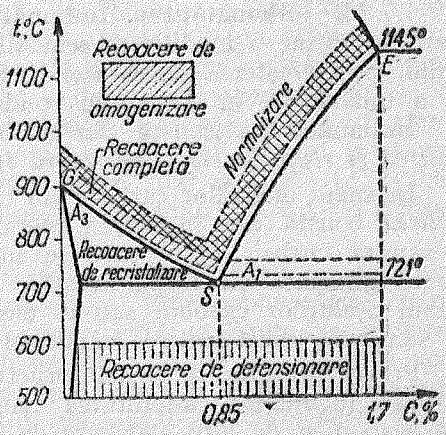


Fig. 1.26. Intervalele temperaturilor de încălzire pentru recoacerea oțelurilor carbon.

● **Recoacerea de recristalizare** (între temperatura de recristalizare și cea corespunzătoare curbei A_1 din diagrama fier-carbon) înlătură efectele deformărilor plastice la rece (ecruisării), mărind în mod corespunzător plasticitatea oțelului.

● **Recoacerea cu recristalizare de fază** constă din încălzirea elementelor de oțel la o temperatură cu puțin superioară curbei de transformare A_3 și are ca variante: *recoacerea completă și recoacerea de normalizare.*

Pentru oțelurile folosite la realizarea elementelor de construcții metalice tipul de tratament aplicat este *normalizarea* (recoacerea de normalizare), constând din încălzirea la temperaturi cu 40...50 °C peste A_3, cu menținerea la această temperatură timp de 30...60 min, timp necesar încălzirii uniforme a piesei pe toată grosimea ei, fiind urmată de o răcire în aer.

Datorită trecerii de două ori prin transformarea α/γ și răcirii în aer liniștit, descompunerea austenitei în perlită se produce complet, rezultând o structură ferito-perlitică cu grăunți fini.

Prin normalizare sunt anulate toate defectele structurale care se produc datorită unei răciri necorespunzătoare la laminare sau la sudare (structuri cu grăunți prea mari, structuri Wiedmannstätten, structuri martensitice). De asemenea este înlăturat efectul deformațiilor la rece și sunt anulate tensiunile remanente rezultate din laminare sau din sudare. Oțelurile normalizate, datorită granulației fine, au caracteristici mecanice superioare față de oțelurile nenormalizate; aceste proprietăți sunt mai accentuate în cazul oțelurilor calmate și se referă în special la tenacitate.

Normalizarea se aplică pieselor laminate, în special tablelor cu grosimi mari. Oțelurile carbon calmate și oțelurile slab aliate sunt supuse de regulă tratamentului de normalizare.

Un efect asemănător se poate obține și prin *dirijarea temperaturii la laminare și răcire*, ce crează elementelor laminate, care se răcesc, condiții asemănătoare cu cele de la normalizare, rezultând în final un oțel cu structură omogenă. Laminarea și răcirea dirijată pot fi aplicate profilelor și tablelor cu grosimi relativ mici.

1.7.2.2. **Îmbunătățirea.** Îmbunătățirea este un tratament termic prin care se obține o modificare sensibilă a caracteristicilor mecanice ale oțelului, prin creșterea rezistenței la rupere și a limitei de curgere, precum și a tenacității, în special în condițiile unor temperaturi coborâte.

Îmbunătățirea constă din două tratamente termice complementare: *călirea și revenirea la temperatură înaltă.*

În cazul oțelurilor care au un conținut de carbon de cel puțin 0,3%, *călirea* constă din încălzirea metalului la o temperatură cu 30...50 °C deasupra curbei A_3 la care se menține până când piesa s-a încălzit în toată grosimea ei. După aceasta, i se aplică o răcire rapidă în apă (în cazul oțelurilor carbon) sau în ulei (în cazul oțelurilor aliate) obținând o structură martensitică fragilă și cu duritate foarte mare.

Proprietatea de a forma structura martensitică dură, respectiv de a se căli (denumită călibilitatea unui oțel), este în funcție de conținutul de carbon și de alte elemente de aliere; viteza de răcire critică este în raport invers cu procentul în care se găsesc aceste elemente. Când carbonul sau elementele de aliere se găsesc în cantități prea mici în aliaj, călirea acestuia nu poate fi realizată.

Datorită lipsei proprietăților plastice, oțelul călit nu poate fi folosit la construcții metalice. De aceea, el este supus unui tratament termic suplimentar denumit revenire.

Revenirea constă din încălzirea metalului la o temperatură sub curba A_1 după care urmează o răcire rapidă în aer sau în ulei. Prin revenire se obține o granulație mai fină și totodată o repartizare mai uniformă a constituenților structurali. Carbonul din martensită difuzează în masa de ferită și se formează carburi de fier. Intervalele temperaturilor de încălzire pentru călirea și revenirea oțelurilor sunt date în figura 1.27.

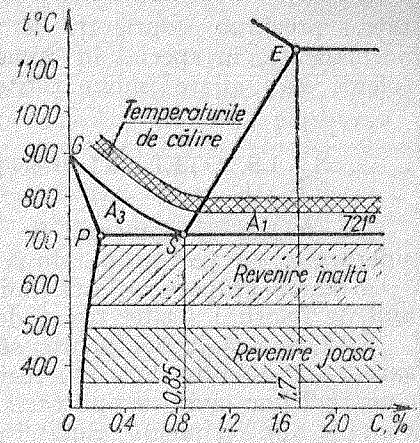


Fig. 1.27. Intervalele temperaturilor de încălzire pentru călirea și revenirea oțelului carbon.

Prin revenire oțelul călit își micșorează duritatea și rezistența la rupere, dar alungirea crește. Proprietățile mecanice ale oțelului călit și revenit sunt superioare celor ale metalului netratat termic.

Cu cât temperatura de revenire este mai coborâtă, cu atât rezistențele mecanice sunt mai ridicate, iar alungirea este mai mică. Se disting: *revenirea la temperatură înaltă* (550...700°C), când se obțin alungiri mari și rezistențe la rupere mai ridicate cu circa 20...50% față de cele ale metalului netratat (în stare laminată); *revenirea la temperatură joasă* (350...500°C) când se obțin rezistențe la rupere cu circa 70...100% mai mari decât cele ale metalului netratat termic, dar alungiri mai reduse.

Tratamentul termic de îmbunătățire constă, așa cum s-a arătat anterior, din călire urmată de revenire la temperatură înaltă; este aplicat în general oțelurilor cu conținut mare de carbon ($C > 0,3\%$) și oțelurilor aliate folosite în construcția pieselor de mașini.

La oțelurile călite și revenite apare o apropiere între limita de curgere și rezistența la rupere. Dacă la oțelurile netratate termic raportul σ_c/σ are valori cuprinse între 0,65 și 0,7, la oțelurile îmbunătățite acest raport se ridică la valori cuprinse între 0,8 și 0,9 (uneori și mai mari). Raportul este cu atât mai apropiat de unitate cu cât temperatura de revenire este mai coborâtă și scade o dată cu creșterea acesteia.

Oțelurile revenite la temperatură mai ridicată ($\sigma_c \simeq 0,8\ \sigma_r$) prezintă și un palier de curgere, dar mai redus decât în cazul oțelului în stare laminată. La oțelurile revenite la temperaturi mai coborâte ($\sigma_c \simeq 0,9\ \sigma_r$) palierul de curgere dispare, domeniul plastic fiind marcat de limita de curgere tehnică σ_{02}.

În ultima vreme, tratamentul termic de îmbunătățire a fost extins și la tablele laminate din oțeluri slab aliate. Prin îmbunătățire cu revenire la temperatură înaltă se obțin oțeluri care au limita de curgere cu 30...50% mai mare decât a oțelului netratat termic, păstrând în același timp o alungire suficient de mare. În acest caz, datorită conținutului redus de carbon, prin călire se obține de fapt o *structură bainitică* și în măsură mai redusă o structură martensitică. Datorită structurii cristaline fine și uniforme, obținută prin îmbunătățire, oțelurile slab aliate îmbună-

tăţite prezintă proprietăţi de tenacitate superioare oţelurilor slab aliate normalizate, în special în domeniul temperaturilor joase; elementele din ţoleuri slab aliate îmbunătăţite pot fi sudate cu unele măsuri speciale.

1.8. OŢELURI PENTRU STRUCTURI METALICE

În funcţie de domeniul de utilizare, produsele din oţel ale industriei siderurgice se pot grupa după schema din figura 1.28.

Această grupare nu este limitativă putând exista (în funcţie de domeniul de folosire) şi alte tipuri de oţeluri.

În grupa oţelurilor pentru structuri metalice se încadrează laminatele, care sunt folosite la: structuri portante, de orice natură din domeniul construcţiilor civile şi industriale, la construcţii hidrotehnice, la rezervoare şi alte recipiente, turle şi platforme de foraj, macarale, poduri, construcţii de nave.

Oţelurile pentru structuri metalice fac parte din categoria largă a oţelurilor pentru construcţii. Ele sunt destinate realizării prin anumite procedee tehnologice (sudare, tăiere, deformare plastică etc.) a unor structuri metalice cu anumite destinaţii.

O delimitare între categoriile susmenţionate nu poate fi întotdeauna riguros stabilită. Oţelurile pentru aparate sub presiune au aceleaşi tehnologii de elaborare, condiţii de prelucrare şi exploatare ca şi oţelurile pentru construcţii, dar le sunt impuse unele condiţii suplimentare privind satisfacerea unor cerinţe specifice domeniului de utilizare şi siguranţei în exploatare.

În funcţie de specificul condiţiilor de utilzare, respectiv de caracteristicile care se garantează pe produsul finit oţelurile pentru structuri metalice pot fi grupate conform schemei din figura 1.29.

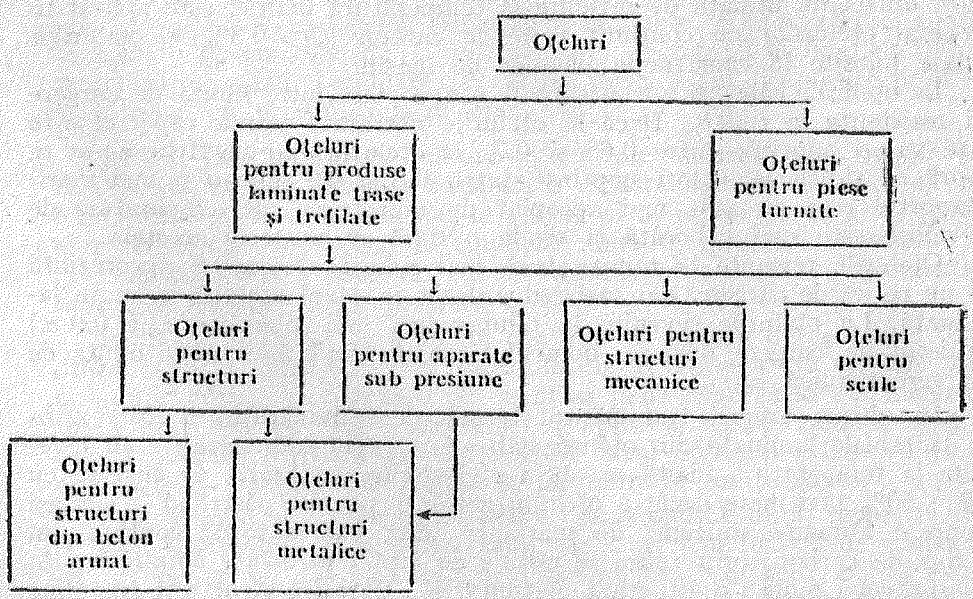


Fig. 1.28. Produse din oţel.

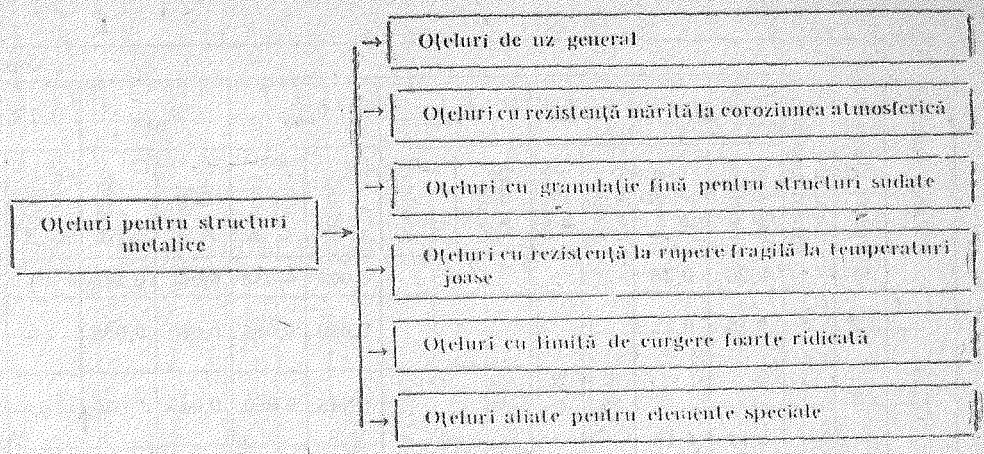


Fig. 1.29. Oțeluri pentru structuri metalice.

1.8.1. OȚELURI DE UZ GENERAL

Oțelurile de uz general pentru construcții sunt oțeluri carbon sau slab aliate, livrate sub formă de produse laminate la cald, folosite în mod curent la execuția construcțiilor metalice. Aceste oțeluri, grupate pe mărci, sunt cuprinse în STAS 500/2-80 „Oțeluri de uz general pentru construcții" și sunt prezentate parțial în tabelul 1.2.

În funcție de valorile caracteristicilor de rezistență, oțelurile se clasifică după *valoarea minimă a rezistenței la rupere*, mărime care reprezintă marca acestora (de exemplu un oțel de marca OL 37 are rezistența la rupere de 360 N/mm²). În unele țări marca oțelului se definește prin limita de curgere sau sub formă de indice fracționar între limita minimă de curgere și rezistența minimă la rupere.

Caracteristicile mecanice și, în special, limita de curgere apar diferențiat în funcție de grosime (valorile mai mari fiind pentru laminatele de grosimi mici).

Caracteristicile mecanice și rezistențele de calcul ale laminatelor din oțel pentru construcții, supuse la diferite solicitări, sunt date în tabelele 1.5 și 1.6.

Oțelurile până la OL 37 inclusiv sunt oțeluri carbon. O aplicare foarte largă o are oțelul OL 37, care are și proprietăți plastice remarcabile ; OL 34 și OL 32 sunt folosite la nituri sau la elemente cu pereți subțiri îndoite la rece, utilizate la construcții slab solicitate (cum sunt de exemplu elementele de închidere, tâmplăria metalică etc.).

Oțelurile cu rezistențe mari (OL 44 și OL 52) sunt oțeluri slab aliate care au ca elemente de aliere, în afară de carbon, mangan, siliciu, aluminiu, uneori și elemente cum sunt vanadiul, niobiul sau titanul în procente mici. Oțelurile slab aliate prezintă de asemenea proprietăți plastice bune.

Aceste oțeluri, fiind folosite în special la construcții sudate, se caracterizează printr-o compoziție chimică riguros dozată și controlată cu scopul de a evita formarea structurilor fragile în diferite situații de prelucrare și exploatare (încălzirea și răcirea la sudare, deformarea plastică la rece etc).

În acest scop în STAS 500-80 se prevede o limitare a conținutului diferitelor elemente chimice pe produs, unde pot apare neuniformități și concentrări ale acestora față de cazul oțelului lichid.

Marca oțelului	Clasa de calitate	Gradul de dezoxidare	Compoziția											
			C_{max}		Mn_{max}		Si_{max}		P_{max}		S_{max}		Cu	
			Pe oțel lichid	Pe produs	Pe oțel lichid	Pe produs	Pe oțel lichid	Pe produs	Pe oțel lichid	Pe produs	Pe oțel lichid	Pe produs	Pe oțel lichid	Pe produs
OL 37	1	*	0,20	0,25	0,80	0,85	*		0,060	0,065	0,060	0,065	—	—
	2	*	0,18	0,22			*		0,050	0,055	0,050	0,055	—	—
	3	** k	0,17	0,19			0,40		0,045	0,050	0,045	0,050	—	—
	4	kf							0,040	0,045	0,040	0,045	—	—
OL 44	2	k	0,20	0,22	1,10	1,15	0,50	0,50	0,050	0,055	0,050	0,055	—	—
	3	** k							0,045	0,050	0,045	0,050	—	—
	4	kf							0,040	0,045	0,040	0,045	—	—
OL 52	2	k	0,20	0,22	1,60	1,65	0,50	0,50	0,050	0,055	0,050	0,055	—	—
	3	** k							0,045	0,050	0,045	0,050	—	—
	4	kf	0,18	0,20					0,040	0,045	0,040	0,045	—	—
RCA 37	1	k	0,10	0,12	0,40	0,45	0,15 ... 0,35	0,12 ... 0,30	min 0,060	min 0,055	0,035	0,040	0,3 ... 0,6	0,3 ... 0,6
	2	k												
	3	k												
RCB 52	2	k	0,18	0,20	1,15	1,20	max 0,60		0,040	0,045	0,040	0,045	0,30 ... 0,6	
	3	** k												
	4	kf												

* Oțelurile cu gradul de dezoxidare neprecizat în tabel se livrează în mod obișnuit (k), conținutul de Si fiind de maxim 0,07% pentru oțelurile necalmate, de maximum 0,17% oțelurile calmate suplimentar (cu aluminiu, vanadiu, titan etc.).

** Clase de calitate care pot fi livrate în stare calmată (k) sau calmată suplimentar.

În STAS 500/2,3-80 și STAS 9021-89, σ_c, σ_r, și δ_5 sunt notate cu R_{eH}, R_m și A%.

Tabelul 1.2

chimică (%)						Caracteristici mecanice								Standardul
Cr		Al_{max}		N_{2max}		σ_c [N/mm²] (kgf/mm²)			σ_r [N/mm²] (kgf/mm²)	δ_5 [%]	Rezilienţa KCU 300/2 la +20°C [J/cm²] (kgfm/cm²)		Energia de rupere Kv la temperatura [J] (kgfm)			
Pe oţel lichid	Pe produs	Pe oţel lichid	Pe produs	Pe oţel lichid	Pe produs	$t \leq 16$ mm	$16 < t \leq 40$	$40 < t \leq 100$			$t \leq 16$	$t > 16$	+20°C	0°C	-20_a°C	
—	—	—	—	—	—						—		—			
—	—	—	—	—	—	240 (24)	230 (23)	210 (21)	360...440 (37...45)	25	69 (7)	59 (6)	27 (2,8)	—		
—	—	—	—	—	—								—	27 (2,8)		
—	—	0,02	—	—	—					26	—		—		27 (2,8)	
—	—	—	—	—	—					22	59 (6)	59 (6)	27 (2,8)	—		
—	—	—	—	—	—	280 (29)	270 (28)	250 (26)	430...540 (44...55)				—	27 (2,8)	—	STAS 500/2-80
—	—	0,02	—	—	—					25	—		—		27 (2,8)	
—	—	—	—	—	—					21	59 (6)	59 (6)	27 (2,8)	—		
—	—	—	—	—	—	350 (36)	340 (35)	330 (34)	510...630 (52...64)				—	27 (2,8)	—	
—	—	0,02	—	—	—					22	—		—		27 (2,8)	
0,50 ... 0,80	0,50 ... 0,80	0,025	0,020	0,015	0,019	240 (24)			360...440 (37...45)	25	69 (7)		27 (2,8)	—		STAS 500/3-80
										26			—	27 (2,8)	—	
0,50 ... 0,80						350 (36)			510...610 (52...62)	21	69 (7)		27 (2,8)	—		
										22	—		—	27 (2,8)	—	

necalmate (n); cu acordul producătorului ele se pot livra şi semicalmate (s) sau calmate pentru semicalmate şi de maximum 0,50% pentru cele calmate. Indicele (kf) se referă la

Conținutul maxim de carbon variază între 0,17 și 0,25% (tab. 1.2). Valorile cele mai reduse le au oțelurile carbon calmate și respectiv oțelurile slab aliate, la care sporul de rezistență este obținut prin alte elemente de aliere (de exemplu mangan).

Conținutul maxim de mangan variază în limitele 0,85...1,55%, valorile cele mai reduse fiind la oțelul carbon, iar cele mai ridicate la oțelurile slab aliate.

Siliciul se găsește în procente neînsemnate la oțelurile carbon necalmate și în procente de 0,40...0,50% la oțelurile carbon calmate sau slab aliate.

Aluminiul apare în procente mai mari la oțelurile slab aliate și de calitate superioară, care sunt calmate suplimentar. Sulful și fosforul se găsesc în cantități reduse. Vanadiul și titanul care au rolul de a crea o o structură cu o granulație fină se găsesc în proporții reduse impuse de condiții de sudabilitate.

Standardele din țara noastră și din alte țări fac o clasificare a oțelurilor pe baza proprietăților de utilizare, definind clase de calitate care diferențiază oțelurile în cadrul aceleași mărci. Clasele pun în evidență pe de o parte comportarea bună la sudare, iar pe de altă parte siguranța elementelor sudate și a sudurilor prin asigurarea tenacității și evitarea ruperilor fragile. Diferențierea oțelurilor în diferite clase de calitate se face prin compoziția chimică și prin verificarea tenacității.

Tenacitatea (proprietatea de a se rupe cu deformații mari) depinde de compoziția chimică și de modul de elaborare a oțelului.

Oțelurile cu proprietăți bune de tenacitate corespund claselor de calitate superioară. Problema tenacității este tratată la § 3.5.4.4.

1.8.2. OȚELURI REZISTENTE LA COROZIUNE ATMOSFERICĂ

Sub acțiunea agresivă a agenților naturali, oțelurile pentru construcții se acoperă cu un strat de oxid a cărui formare este în funcție de următorii factori: rezistența la coroziune a oțelului, gradul de agresivitate a agenților naturali, natura și grosimea stratului de protecție de la suprafața metalului.

Rezistența la coroziune a oțelurilor pentru construcții rezultă, în principal, pe seama compoziției lor chimice. Un rol important îl are alierea cu cuprul, fosforul, cromul, nichelul sau alte elemente (v. tab. 1.2), care intră în soluție prin reacție anodică mai lent decât fierul. Pe această bază a fost elaborată o grupă de oțeluri pentru construcții — rezistente la coroziune atmosferică sau grupa oțelurilor patinabile (RC) cunoscute în alte țări sub denumirea de oțeluri CORTEN — caracterizată prin proprietăți de rezistență la coroziune superioare celor ale oțelurilor pentru construcții obișnuite.

Experimentările au arătat că după primii 1...3 ani de expunere — timp în care stratul de oxid de pe suprafața oțelurilor de uz general se dezvoltă rapid în condițiile unei coroziuni generale — la oțelurile patinabile, fenomenul de coroziune intră într-un regim cvasistaționar. Procesul se dezvoltă ascendent, dar cu o creștere mai puțin accentuată la oțelurile patinabile (fig. 1.30).

Valorile pierderilor de greutate, care caracterizează rezistența la coroziune a oțelurilor, sunt în funcție de condițiile de mediu. Creșterea agresivității se manifestă în mediul industrial urban mai bogat în anhidridă

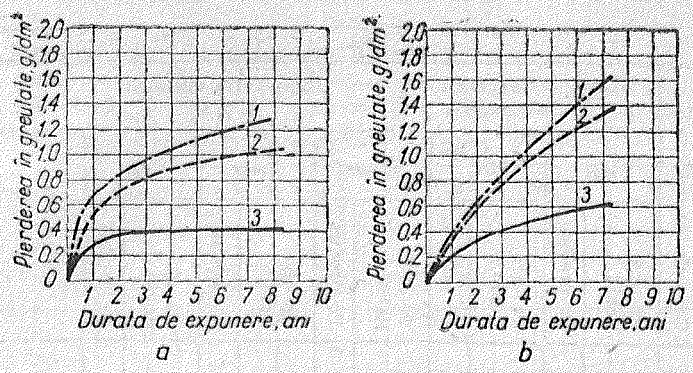


Fig. 1.30. Acțiunea coroziunii asupra oțelurilor:

a — mediu industrial; *b* — mediu marin; *1* — oțel carbon; *2* — oțel cu cupru; *3* — oțel patinabil.

sulfuroasă) și în mediul marin (mai bogat în săruri minerale). În toate condițiile de mediu, oțelurile patinabile înregistrează pierderi în greutate de 2...4 ori mai reduse decât oțelurile de calitate curentă. Avantajoase pentru stabilizarea rapidă a fenomenului de coroziune de la suprafața oțelurilor patinabile sunt expunerile, care asigură alternanța rapidă uscată umed a suprafeței oțelului. Atmosfera marină sau atmosfera industrială cu o agresivitate accentuată nu permit stabilizarea fenomenului de coroziune. De aceea, în astfel de situații, este indicată protejarea suprafețelor prin vopsire.

Elementele de construcții care rămân în atmosferă cu agresivitate redusă pot rămâne nevopsite. După formarea primului strat de oxid care se desprinde, suprafața capătă o culoare roșcată-cafenie care poate rămâne ca atare.

1.8.3. OȚELURI CU GRANULAȚIE FINĂ PENTRU CONSTRUCȚII SUDATE

Aceste oțeluri sunt oțeluri slab aliate cu granulație fină (STAS 9021-89) cu adaos de aluminiu, niobiu, vanadiu, zirconiu, titan și care, după normalizare, obțin valori ale limitei de curgere între 285 și 460 N/mm² și chiar mai mari. Prin compoziția lor chimică (tab. 1.3) și tehnologia de fabricație conțin precipitate de nitruri și carburi fin distribuite, care împiedică creșterea granulației în domeniul austenitic și determină formarea unei granulații fine. Având caracteristici mecanice ridicate, proprietăți plastice și comportare bună la sudare, rezistențe remarcabile față de rupere fragilă și tenacitate la temperaturi scăzute, aceste oțeluri (OCS) se recomandă pentru structuri metalice sudate cu solicitări mari și condiții grele de exploatare.

1.8.4. OȚELURI CU REZISTENȚĂ LA RUPERE FRAGILĂ LA TEMPERATURI JOASE ȘI FOARTE JOASE (CRIOGENICE)

Pentru structuri metalice puternic solicitate care lucrează la temperaturi joase (—30...—60 °C), cum sunt recipientele și rezervoarele pentru transportul și depozitarea gazelor lichefiate (butan, propan, amoniac etc.) la care temperatura de menținere în stare lichidă la presiunea atmosferică

Marca oțelului	Clasa de calitate	Grad de dezoxidare	Compoziția chimică [%]									
			C_{max}		Mn		Si_{max}		P_{max}		S_{max}		Alte elemente
			Pe oțel lichid	Pe produs	Pe oțel lichid	Pe produs	Pe oțel lichid	Pe produs	Pe oțel lichid	Pe produs	Pe oțel lichid	Pe produs	
OCS 44	5*a*[1]	k	0,20	0,22	0,80...1,10	0,75...1,15	0,50	0,50	0,040	0,045	0,040	0,045	V — *min* 0,05 Ni — *max* 0,30 Al — *min* 0,015 Nb — *min* 0,02
	5*b*[1]												
	6*a*												
OCS 52	5*a*[1]	k	0,18	0,20	1,10...1,60	1,05...1,65	0,50	0,50	0,030	0,035	0,030	0,035	V — *min* 0,05 Ni — *max* 0,70 Al — *min* 0,015 Nb — *min* 0,02 N_2 — circa 0,02
	5*b*[1]												
	6*a*												
	7*a*												
OCS 55	3*a*	k	0,20	0,22	1,10...1,65	1,05...1,70	0,40	0,40	0,025	0,040	0,035	0,040	V — *min* 0,05 Ni — *max* 0,70 Al — *min* 0,02 Nb — *min* 0,02 Ti — *min* 0,005
	3*b*												
	4*a*												
	4*b*												
	5*a*[1]												
	5*b*[1]												
OCS 58	3*a*	k	0,19	0,21	1,10...1,65	1,05...1,70	0,50	0,50	0,035	0,040	0,035	0,040	V — *max* 0,18 Ni — *max* 0,80
	3*b*												
	4*a*												
	4*b*												
	5*a*[1]												
	5*b*[1]												

OBSERVAȚII: 1) — clase care se vor evita pe cât posibil
2) — elementele indicate pot fi folosite la elaborare separat sau în combinație,
— mărcile notate cu *b* au limita de curgere garantată la cald

Tabelul 1.3

Caracteristici mecanice					Rezilienta KCU 300/2 +20°C, [J/cm²] (kgfm/cm²)		Energia de rupere KV la temperatura [J] (kgfm)					Standard
σ_c [N/mm²] (kgf/mm²)			σ_r [N/mm²] (kgf/mm²)	δ_5 [%]	Stare de livrare	Stare de îmbătrânire	0°C	−20°C	−30°C	−40°C	−50°C	
$t \leq 16$ mm	$16 < t \leq 40$	$40 < t \leq 100$										
285 (29)	255 (26)	215 (22)	430...540 (44...55)	23	60 (6)	35 (3,5)	—		28 (2,8)	—		STAS 9021-89
							—		28 (2,8)	—		
							—			28 (2,8)	—	
355 (36)	335 (34)	315 (32)	510...610 (52...62)	20	60 (6)	35 (3,5)	—		28 (2,8)	—		
							—		28 (2,8)	—		
							—			28 (2,8)	—	
							—				28 (2,8)	
420 (43)	410 (42)	365 (37)	540...680 (55...69)	19	70 (7)	40 (4)	28 (2,8)	—				
							28 (2,8)	—				
							—	28 (2,8)	—			
							—	28 (2,8)	—			
							—		28 (2,8)	—		
							—		28 (2,8)	—		
460 (47)	450 (46)	400 (41)	570...730 (58...74)	19	70 (7)	40 (4)	28 (2,8)	—				
							28 (2,8)	—				
							—	28 (2,8)	—			
							—	28 (2,8)	—			
							—		28 (2,8)	—		
							—		28 (2,8)	—		

la latitudinea producătorului și se specifică în certificatul de calitate fără conținutul lor

este sub —60 °C, se folosesc oțeluri care prezintă o tenacitate deosebită la temperaturi joase. În această categorie intră oțelurile cu granulație fină cu clasele de calitate 5, 6 și 7 (STAS 9021-89).

Unele produse gazoase din industria chimică și petrochimică se pot lichefia numai la presiuni foarte mari. Temperatura de menținere în stare lichidă la presiunea atmosferică este foarte joasă, apropiindu-se de 0 °K (absolut). Aceste temperaturi se definesc drept *temperaturi criogenice*. Temperaturile de lichefiere corespunzătoare unora din aceste gaze sunt: metan —161,5 °C; oxigen —182,97 °C; azot —195,91 °C; hidrogen —252,78 °C.

Pentru depozitarea și transportul acestor gaze lichefiate se folosesc rezervoare și recipiente din oțeluri cu tenacitate la temperaturi joase, denumite și *oțeluri criogenice*. Acestea sunt: oțeluri aliate cu 9% nichel sau oțeluri inoxidabile, austenitice (cu crom și nichel).

În afară de oțelurile criogenice propriu-zise, la temperaturi între —60 și —120 °C, pot fi utilizate oțeluri aliate cu nichel, dar într-un procent redus (1,5 . . .5%).

1.8.5. OȚELURI CU LIMITA DE CURGERE FOARTE RIDICATĂ

Aceste oțeluri au limita de curgere mai mare de 510 N/mm² și sunt oțeluri slab aliate, utilizate în stare îmbunătățită (călire în apă și revenire înaltă, sau normalizare și revenire), având de regulă o structură bainitică (tab. 1.4).

1.8.6. OȚELURI ALIATE PENTRU ELEMENTE SPECIALE

În construcții metalice se folosesc oțeluri aliate (cu crom sau cu crom și molibden) în stare îmbunătățită la executarea șuruburilor de înaltă rezistență.

1.9. OȚELURI PREVĂZUTE ÎN NORMELE ALTOR ȚĂRI

În tabelul 1.7. se prezintă proprietățile mecanice ale celor mai folosite oțeluri din S.U.A.

Tendința de unificare economică a țărilor din Europa de Vest a condus la apariția Standardului European EURONORM EN 10025—1990. Acesta precizează cerințele pentru produse lungi și produse plate laminate la cald din oțeluri de masă (BS) și oțeluri de calitate nealiate (QS), destinate utilizării în fabricația de elemente pentru construcții sudate și îmbinate cu tije, exploatate la temperatura mediului ambiant.

În ceea ce privește produsele laminate din oțel, apar aspectele prezentate în continuare:

În domeniul produselor plate se laminează table de orice dimensiune plană, respectiv grosime. Acestea au o aplicare largă în diferite domenii, asigurând realizarea unei game largi de produse.

Laminarea platbandelor, respectiv a pieselor plate de lățimi mici este limitată, acestea obținându-se, după necesități, prin tăiere din tablă.

Tabelul 1.4

Marca oțelului	Clasa de calitate	Grad de dezoxidare	Compoziția chimică pe oțel lichid [%]											Caracteristici mecanice						Rezilienta *KCV* la temperatura: [J/cm²] (kgf·m/cm²)				Standardul
														σ_c [N/mm²] (kgf/mm²)			σ_r [N/mm²] (kgf/mm²)							
			C_{max}	Si	Mn	S_{max}	P_{max}	Ni_{max}	Mo	V_{max}	Cr_{max}	Cu_{max}	Alte elemente		$t \leqslant 64$ mm	$64 < t \leqslant 100$	$50 < t \leqslant 130$	$t \leqslant 64$ mm	$64 < t \leqslant 100$	$50 < t \leqslant 130$	Alungirea la rupere $As\%$ $Lo = 5{,}63\sqrt{So}$	0°C	−20°C	−40°C	−60°C	
OCS 90			0,18	0,10...0,50	1,20...1,60	0,02	0,02	1,00	—	—	—	—	Cr — *max* 2,0 Cu — *max* 1,5 Mo — *max* 1,0 Al — *max* 0,08 Ti — *max* 0,20	Nb — *max* 0,06 V — *max* 0,20 Zr — *max* 0,12 B — *max* 0,005 N_2 — *max* 0,015	685 (70)	620 (63)	—	795...930 (81...95)	725...930 (74...95)	—	—	—	60 (6)	40* (4)	35 (3,5)	40 (4)	Proiect NTR 471-82
CS 90-1			0,15	0,10...0,50	1,20...1,60	0,02	0,02	1,00	0,45...0,55	0,10	0,25	0,25	—		—	—	460 (47)*	—	—	630...745 (64...76)	16*	50* (5)	—	—	—	

* Valorile au fost determinate pe epruvete luate în direcție tansversală față de direcția de deformare.

Tabelul 1.5

Marca oțelului	Limita de curgere R_e sau R_{e2} minimă (valori rotunjite)				γ ($t \leq 16$ mm)	Rezistența de calcul R pentru întindere, compresiune și încovoiere (valori rotunjite)			
	$t \leq 16$ mm		$16 < t \leq 40$ mm			$t \leq 16$ mm		$16 < t \leq 40$ mm	
	[kgf/mm²]	[N/mm²]	[kgf/mm²]	[N/mm²]		[kgf/mm²]	[N/mm²]	[kgf/mm²]	[N/mm²]
OL 34	21	210	20	200	1,10	19	190	18	180
OLT 35	23	230	22	220	1,10	21	210	20	200
OL 37	24	240	23	230	1,10	22	220	21	210
RCA 37*	24	240	23	230	1,10	22	220	21	210
OLT 45	26	260	25	250	1,10	24	240	23	230
OL 44	29	280	28	270	1,12	26	260	25	250
OCS 44	29	285	26	255	1,12	26	260	25	250
OL 52*	36	350	35	340	1,15	31,5	315	30	300
RCB 52*	36	355	35	345	1,15	31,5	315	30	300
OCS 52	36	355	34	335	1,15	31,5	315	30	300
OCS 55	43	420	41	410	1,20	36	360	34	340
OCS 58	47	460	45	450	1,20	39	390	37	370

Observații: Rezistențele de calcul pentru grosimi $t > 40$ mm se obțin împărțind limita de curgere a treptei de grosimi respective prin coeficientul γ_m din acest tabel.

* Laminatele din mărcile RCA 37 se fabrică cu grosimi $t < 12$ mm, iar din marca RCB 52, cu $t \leq 20$ mm, conform STAS 500/3-80.

Tabelul 1.6

Solicitarea	Simbol	Coeficient γ (aplicat față de R)	Rezistențe de calcul R, în N/mm² pentru oțel laminat marca:						
			OLT 35	OL 37 RCA 37	OLT 45	OL 44 OCS 44	OL 52 OCS 52 RCB 52	OCS 55	OCS 58
Întindere, compresiune, încovoiere	R	1,0	200	210	230	250	300	340	370
Forfecare	R_f	0,6	120	120	140	150	180	210	220
Presiune locală la un cilindru rezemat pe un plan (determinată cu formula lui Hertz)	R_l	4,0	800	840	920	1 000	1 200	1 360	1 500
Presiune locală determinată pe planul diametral al cilindrului	R_d	0,04	8,0	8,4	9,2	10	12	13,6	15
Rezistențe de calcul pentru profile laminate cu grosimea $t \leq 16$ mm									
Întindere, compresiune, încovoiere	R	1,0	210	220	240	260	315	360	390
Forfecare	R_f	0,6	125	130	145	155	190	215	235

Tabelul 1.7

Tipul oţelului	Simbolul ASTM		σ_c [ksi]	σ_c [N/mm²]	σ_r [ksi]	σ_r [N/mm²]
Carbon	A 36		32	224	58—80	406—560
			36	252	58—80	406—560
	A 529		42	294	60—85	420—595
De înaltă rezistenţă slab aliat	A 441		40	280	60	420
			42	294	63	441
			46	322	67	469
			50	350	70	490
	A 572 Marca	42	42	294	60	420
		50	50	350	65	455
		60	60	420	75	525
		65	65	455	80	560
Rezistent la coroziune, înaltă rezistenţă, slab aliat	A 242		42	294	63	441
			46	322	67	469
			50	350	70	490
	A 588		42	294	63	441
			46	322	67	469
			50	350	70	490
Aliaj îmbunătăţit	A 852		70	490	90—110	630...770
Aliaj îmbunătăţit	A 514		90	630	100—130	700...910
			100	700	110—130	770...910

În ceea ce priveşte profilele laminate, producţia ţării noastre se limitează deocamdată la profilele mici şi mijlocii. Dintre acestea, cornierele se laminează în dimensiuni care se apropie de cele produse în alte ţări din Europa sau de pe alte continente. Ca exemplificare, se precizează că lăţimea maximă a aripii cornierelor laminate în România este de 160 mm (în alte ţări europene atinge 200 mm).

Profilele U laminate în România au înălţimea maximă de 300 mm (în alte ţări se produc profile cu înălţimea de 400 mm).

Diferenţe semnificative apar la profilele dublu T. În timp ce în ţara noastră se laminează numai profile cu tălpi înguste de grosime variabilă şi cu înălţimea limitată la 400 mm, în ţările din Europa de Vest şi în S.U.A. se produc profile dublu T cu înălţimi până la 1 000 mm, cu tălpi de grosime constantă, având lăţimi, până la 300 mm şi respectiv 400 mm. Aria secţiunii transversale a profilelor creşte cu până la 330—360%, asigurând o majorare corespunzătoare a celorlalte caracteristici ale secţiunii transversale. În multe cazuri aceste profile acoperă situaţii în care în ţara noastră se folosesc elemente dublu T obţinute prin sudare din fâşii de tablă groasă.

Tabelul 1.8

Simbol		Tipu dezoxidării	Subgrupa	C% max. pentru o grosime nominală de produs [mm]			Mn% max.	Si% max.	P% max.	S% max.	N% max.
Conform EU 25-72	Conform standard francez		(3)	⩽ 16	> 16 ⩽ 40	> 40 (4)					(1)(2)
Fe 310-0(5)	A33	la aleger	BS	—	—	—	—	—	—	—	—
Fe 360-B(5)	E24-2	la aleger	BS	0,17	0,20	—	—	—	0,045	0,045	0,009
Fe 360 B(5)		FU	BS	0,17	0,20	—	—	—	0,045	0,045	0,007
Fe 360 B		FN	BS	0,17	0,17	020	—	—	0,045	0,045	0,009
Fe 360 C	E24-3	FN	QS	0,17	0,17	0,17	—	—	0,040	0,040	0,009
Fe 360 D_1	E24-4	FF	QS	0,17	0,17	0,17	—	—	0,035	0,035	—
Fe 360 D_2	E24-4	FF	QS	0,17	0,17	0,17	—	—	0,035	0,035	—
Fe 430 B	E28-2	FN	BS	0,21	0,21	0,22	—	—	0,045	0,045	0,009
Fe 430 C	E28-3	FN	QS	0,18	0,18	0,18(6)	—	—	0,040	0,040	0,009
Fe 430 D_1	E28-4	FF	QS	0,18	0,18	0,18(6)	—	—	0,035	0,035	—
Fe 430 D_2	E28-4	FF	QS	0,18	0,18	0,18(6)	—	—	0,035	0,035	—
Fe 510 B	E36-2	FN	BS	0,24	0,24	0,24	1,60	0,55	0,045	0,045	0,009
Fe 510 C	E36-3	FN	QS	0,20	0,20(7)	0,22	1,60	0,55	0,040	0,040	0,009
Fe 510 D_1		FF	QS	0,20	0,20(7)	0,22	1,60	0,55	0,035	0,035	—
Fe 510 D_2		FF	QS	0,20	0,20(7)	0,22	1,60	0,55	0,035	0,035	—
Fe 510 DD_1	E36-4	FF	QS	0,20	0,20(7)	0,22	1,60	0,55	0,035	0,035	—
Fe 510 DD_2	E36-4	FF	QS	0,20	0,20(7)	0,22	1,60	0,55	0,035	0,035	—
Fe 490-2	A50-2	FN	BS	—	—	—	—	—	0,045	0,045	0,009
Fe 590-2	A60-2	FN	BS	—	—	—	—	—	0,045	0,045	0,009
Fe 690-2	A70-2	FN	BS	—	—	—	—	—	0,045	0,045	0,009

(1) Este admisă depășirea valorilor prescrise cu condiția ca pentru fiecare creștere cu0,001%N_2 0,012%.
(2) Valoarea maximă prescrisă pentru azot nu se aplică atunci când compoziția chimică prede legare a azotului; elementele de legare a azotului trebuie menționate în documentul
(3) BS — oțel de masă; QS — oțel de calitate.
(4) Pentru profilele și laminatele comerciale de grosime nominală < 100 mm conținutul de
(5) Disponibile numai în grosimi nominale ⩽ 25 mm.
(6) Pentru grosimi nominale > 150 mm: C = max. 0,20%.
(7) Pentru grosimi nominale > 30 mm și pentru oțeluri profilate la rece în matrițe

Profilele laminate în S.U.A. și în țările din Europa de Vest sunt prezentate în [P3], [P4].

Conform înțelegerilor și convențiilor la care sunt parte, următoarele țări sunt obligate să implementeze Standardul European EN 10025—1990: Austria, Belgia, Danemarca, Elveția, Finlanda, Franța, Germania, Grecia, Irlanda, Islanda, Luxemburg, Marea Britanie, Norvegia, Olanda, Portugalia, Spania, Suedia (în România Standardului European îi corespund în prezent standardele: STAS 500/1-89 „Oțeluri de uz general pentru construcții. Condiții tehnice de calitate" și STAS 500/2-80 „Oțeluri de uz general pentru construcții. Mărci").

În continuare se prezintă compoziția chimică pe: oțel lichid (tab.1.8), pe produs (tab. 1.9) și caracteristicile mecanice (tab. 1.10 și tab. 1.11) pentru oțelurile cuprinse în EN 10025—1990.

Noțiunile și simbolurile utilizate de standardul European care se întâlnesc în tabelele 1.8, 1.9 și 1.10 sunt:

BS — oțel de masă: oțeluri din clasele de calitate 0;2 și B;

Tabelul 1.9

Simbol		Tipul dezoxidării	Subgrupa	C% max. pentru o grosime nominală de produs [mm]			Mn% max	Si% max	P% max	S% max	N% max
Conform EU 25-72	Conform standard francez		(3)	⩽16	>16 ⩽40	>40 (4)					(1)(2)
Fe 310-0(5)	A33	la alegere	BS	—	—	—	—	—	—	—	—
Fe 360B(5)	E24-2	la alegere	BS	0,21	0,25	—	—	—	0,055	0,055	0,011
Fe 360B(5)		FU	BS	0,21	0,25	—	—	—	0,055	0,055	0,009
Fe 360B		FN	BS	0,15	0,19	0,23	—	—	0,055	0,055	0,011
Fe 360C	E24-3	FN	QS	0,19	0,19	0,19	—	—	0,050	0,050	0,011
Fe360D$_1$	E24-4	FF	QS	0,19	0,19	0,19	—	—	0,045	0,045	—
Fe 360D$_2$	E24-4	FF	QS	0,19	0,19	0,19	—	—	0,045	0,045	—
Fe 430B	E28-2	FN	BS	0,24	0,24	0,25	—	—	0,055	0,055	0,011
Fe 450C	E 28-3	FN	QS	0,21	0,21	0,21(6)	—	—	0,050	0,050	0,011
Fe 430 D$_1$	E28-4	FF	QS	0,21	0,21	0,21(6)	—	—	0,045	0,045	—
Fe 430D$_2$	E28-4	FF	QS	0,21	0,21	0,21(6)	—	—	0,045	0,045	—
Fe 510B	E36-2	FN	BS	0,27	0,27	0,27	1,70	0,60	0,055	0,055	0,011
Fe 510C	E36-3	FN	QS	0,23	0,23(7)	0,24	1,70	0,60	0,050	0,050	0,011
Fe 510D$_1$		FF	QS	0,23	0,23(7)	0,24	1,70	0,60	0,045	0,045	—
Fe 510D$_2$		FF	QS	0,23	0,23(7)	0,24	1,70	0,60	0,045	0,045	—
Fe 510DD$_1$	E36-4	FF	QS	0,23	0,23(7)	0,24	1,70	0,60	0,045	0,045	—
Fe 510 DD$_2$	E36-4	FF	QS	0,23	0,23(7)	0,24	1,70	0,60	0,045	0,045	—
Fe 490-2	A 50-2	FN	BS	—	—	—	—	—	0,055	0,055	0,011
Fe 590-2	A60-2	FN	BS	—	—	—	—	—	0,055	0,055	0,011
Fe 690-2	A70-2	FN	BS	—	—	—	—	—	0,055	0,055	0,011

conținutul maxim de P să fie redus cu 0,005%; totuși conținutul de N_a pe produs nu va depăși

zintă un conținut de Al total de min. 0,020% sau sunt prezente în calitate suficientă alte elemente de inspecție.

C — prin acord.

C = max. 0,22%.

QS — oțel de calitate: oțeluri din clasele de calitate C, D (D1 și D2) și DD (DD1 și DD2) D1, D2, DD1, DD2 sunt subdiviziuni ale claselor de calitate D și DD. Calitățile se deosebesc între ele prin sudabilitate și valorile prescrise pentru energia de rupere la încovoiere prin șoc;

N — laminare normalizată, care prin dirijarea temperaturii la laminare și răcire, creează elementelor laminate la răcire, condiții asemănătoare cu cele de la tratamenul termic de normalizare;

FU — oțel necalmat

FN — oțel semicalmat

FF — oțel complet calmat conținând în cantitate suficientă elemente de legare completă a azotului (de ex. Al 0,02%).

În tabelul 1.12 se prezintă corespondența dintre simbolurile naționale pentru oțeluri și simbolurile din EU 25 care provizoriu sunt acceptate și în EN 10025.

Simbol		Tipul dezoxidării	Subgrupa (3)	Limita de curgere R_{eH}(1) [N/mm²]							
Conform EU 25-72	Conform standard francez			Grosimea nominală [mm]							
				⩽18	>18 ⩽40	>40 ⩽63	>63 ⩽80	>80 ⩽100	>100 ⩽150	>150 ⩽200	>200 ⩽250
Fe 310-0(2)	A33	la alegere	BS	185	175	—	—	—	—	—	—
Fe 360B(2)	E24-2	la alegere	BS	235	225	—	—	—	—	—	—
Fe 360B(2)		FN	BS	235	225	—	—	—	—	—	—
Fe 360B		FN	BS	235	225	215	215	215	195	185	175
Fe 360C	E24-3	FN	QS	235	225	215	215	215	195	185	175
Fe 360D$_1$	E24-4	FF	QS	235	225	215	215	215	195	185	175
Fe 360D$_2$	E24-4	FF									
Fe 430B	E28-2	FN	BS								
Fe 430C	E28-3	FN	QS								
Fe 430D$_1$	E28-4	FF	QS	275	265	255	245	235	225	215	205
Fe 430D$_2$	E28-4	FF	QS								
Fe 510B	E36-2	FN	BS								
Fe 510C	E36-3	FN	QS								
Fe 510D$_1$		FF	QS								
Fe 510D$_2$		FF	QS	355	345	335	325	315	295	285	275
Fe 510DD$_1$	E36-4	FF	QS								
Fe 510DD$_2$	E36-4	FF	QS								
Fe 490-2(4)	A50-2	FN	BS	295	285	275	265	255	245	235	225
Fe 590-2	A60-2	FN	BS	335	325	315	305	295	275	265	255
Fe 690-2	A70-2	FN	BS	360	355	345	335	325	305	295	285

(1) Valoarea indicată în tabel se aplică la epruvete longitudinale (*l*) pentru încercarea la trac
(2) Disponibil numai în grosimi nominale ⩽ 25 mm.
(3) BS — oțel de masă; QS — oțel de calitate.
(4) Nu se aplică în profile U, corniere și profilate.

1.10. STRUCTURA ALUMINIULUI ȘI A ALIAJELOR DE ALUMINIU

1.10.1. STRUCTURA CRISTALINĂ

Aluminiul cristalizează în rețea cubică cu fețe centrate. Elementele care intră în aliajele de aluminiu sunt următoarele: fierul, siliciul, manganul și magneziul.

În afară de aliajele cu două elemente de aliere, denumite și *aliaje binare*, aluminiul (ca și oțelul) poate să formeze și *aliaje complexe* în care intră mai multe elemente de aliere. Astfel, există aliaje: Al—Mg—Si, Al—Cu—Mg, Al—Zn—Mg.

Tabelul 1.10

Rezistența la rupere R_m(1) [N/mm²] Grosimea nominală [mm]				Orientarea epruvetei (1)	Alungirea minimă [%] (1) $L_0 = 80$ mm Grosimea nominală [mm]					$L_0 = 5{,}65\sqrt{S_0}$ Grosimea nominală [mm]				
					≤ 1	> 1 ∧ ≤ 1,5	> 1,5 ∧ ≤ 2	> 2 ∧ ≤ 2,5	> 2,5 ∧ ≤ 3	> 3 ∧ ≤ 40	> 40 ∧ ≤ 63	> 63 ∧ ≤ 100	> 100 ∧ ≤ 150	> 150 ∧ ≤ 250
< 3	≥ 3 ≤ 100	> 100 ≤ 150	> 150 ≤ 250											
310-540	290-510	—	—	*l*	10	11	12	13	14	18	—	—	—	—
				t	8	9	10	11	12	16	—	—	—	—
360-510	340-470	—	—											
360-510	340-470	—	—											
360-510	340-470	340-470	320-470	*l*	17	18	19	20	21	26	25	24	22	21
360-510	340-470	340-470	320-470	*t*	15	16	17	18	19	24	23	22	22	21
360-510	340-470	340-470	320-470											
430-580	410-560	400-540	380-540	*l*	14	15	16	17	18	22	21	20	18	17
				t	12	13	14	15	16	20	19	18	18	17
510-680	490-630	470-630	450-630	*l*	14	15	16	17	18	22	21	20	18	17
				t	12	13	14	15	16	20	19	18	18	17
490-560	470-610	450-610	440-610	*l*	12	13	14	15	18	20	19	18	16	15
				t	10	11	12	13	14	18	17	16	15	14
590-770	570-710	550-710	540-710	*l*	8	9	10	11	12	16	15	14	12	11
				t	6	7	8	9	10	14	13	12	11	10
690-900	670-830	650-830	640-830	*l*	4	5	6	7	8	11	10	9	8	7
				t	3	4	5	6	7	10	9	8	7	8

ţiune. Pentru table, benzi şi platbande cu lăţime ≥ 600 mm se folosesc epruvete transversale (*t*)

Prin ridicarea temperaturii, se produce o regenerare, constând din refacerea reţelei cristaline, urmată de fenomenul de recristalizare (refacerea cristalelor, sfărâmate datorită deformaţiilor plastice produse la rece). Temperatura la care începe recristalizarea aliajelor de aluminiu este în jurul a 150 °C, iar temperatura de topire în jurul a 600 °C.

1.10.2. MATURIZAREA SAU ÎMBĂTRÂNIREA NATURALĂ

Una din principalele caracteristici ale multor aliaje de aluminiu este sporirea naturală la temperatura ambiantă a rezistenţelor mecanice.

Majoritatea elementelor de aliere au o solubilitate redusă în aluminiu, în stare de soluţie solidă la temperatura ambiantă. Pentru a putea păstra în soluţie solidă aceste elemente într-o proporţie mai mare (corespunzătoare

Tabelul 1.11

Simbol		Tipul dezoxidării	Subgrupa (2)	Temperatura [°C]	Energia de rupere [J] minimă, grosimea nominală [mm] (4)	
Conform EU 25-72	Conform standard francez				>10 (3) ≤150	>150 (3) ≤250
Fe 310-0(4)	A33	la alegere	BS	—	—	—
Fe 360B(4)(5)	E24-2	la alegere	BS	20	27	—
Fe 360B(4)(5)		FU	BS	20	27	—
Fe 360B(5)		FN	BS	20	27	23
Fe 360C	E24-3	FN	QS	0	27	23
Fe $360D_1$	E24-4	FF	QS	−20	27	23
Fe $360D_2$	E24-4	FF	QS	−20	27	23
Fe 430B(5)	E28-2	FN	BS	20	27	23
Fe 430C	E28-3	FN	QS	0	27	23
Fe $430D_1$	E28-4	FF	QS	−20	27	23
Fe $430D_2$	E28-4	FF	QS	−20	27	23
Fe 510B(5)	E36-2	FN	BS	20	27	23
Fe 510C	E36-3	FN	QS	0	27	23
Fe $510D_1$		FF	QS	−20	27	23
Fe $510D_2$		FF		−20	27	23
Fe $510DD_1$	E36-4	FF	QS	−20	40	33
Fe $510 DD_2$	E36-4	FF	QS	−20	40	33
Fe 490-2	A50-2	FN	BS	—	—	—
Fe 590-2	A60-2	FN	BS	—	—	—
Fe 690-2	A70-2	FN	BS	—	—	—

(1) Pentru epruvete reduse, se aplică fig. 3.30.
(2) BS — oţel de masă; QS — oţel de calitate.
(3) Pentru profile şi laminate comerciale cu grosime nominală > 100 mm valorile pot face obiectul acordului.
(4) Disponibil numai în grosimi nominale ≤ 25 mm.
(5) Caracteristicile la încovoierea prin şoc ale produselor de calitate B nu se verifică decât dacă este specificat în cererea de ofertă şi comandă.

celei care se găseşte în stare lichidă), se recurge la o răcire rapidă (călire) a metalului topit aflat în stare de soluţie suprasaturată; călirea permite păstrarea soluţiei omogene suprasaturate în stare solidă. Soluţia solidă suprasaturată este o fază instabilă şi caută să-şi capete echilibrul prin precipitarea elementelor aflate în exces. Precipitarea fazei suprasaturate la temperatura ambiantă produce o creştere a caracteristicilor mecanice ale aliajului. Fenomenul este definit ca *maturizare sau durificare la rece*.

Fenomenul de maturizare începe aproape imediat după călire (2 . . .4 ore) şi se termină după 4 . . .8 zile. Viteza maximă se manifestă în primele 5 . . .15

Tabelul 1.12

Simbol	Simboluri corespondente în										
	Germania										
Conform EU 25	Nr. material	Simbol	Franța	Marea Britanie	Spania	Itlia	Belgia	Suedia	Portugalia	Austria	Norvegia
Fe 310-0	1.0035	St 33	A 33		A310-0	Fe 320	A 320	1310-00	Fe 310-0	St 320	
Fe 360B	1.0037	St37-2	E24-4			Fe 360B	AE 235-B	1312-00	Fe360-B		NS12120
Fe 360 BFU	1.0038	UST 37-2			AE 235B -FU					USt360B	NS12122
Fe 360 BFN	1.0038	RSt 37-2		40B	AE 235B -FN			1312-00		RSt360B	NS12123
Fe 360C	1.0116	St 37-3U	E24-3	40C	AE 235 C	Fe 360 C	AE 235-C		Fe360-C	St360C St360CE	NS12124
Fe 360D$_1$	1.0116	St 37-3N	E24-4	40D	AE 235D	Fe 360D	AE 235-D		Fe360-D	St360D	NS12124
Fe 360D$_2$	—	—									
Fe 430B	1.0044	St 44-2	E28-2	43B	AE 275B	Fe 430B	AE 255-B	1412-00	Fe430-B	St430B	NS12142
Fe 430C	1.0144	St 44-3U	E28-3	43C	AE 275C	Fe 430C	AE 255-C		Fe430-C	St430C St430CE	NS12143
Fe 430D$_1$	1.0144	St 44-3N	E28-4	43D	AE 275 *D*	Fe 430D	AE 255-D	1414-00	Fe430-D	St430D	NS12143
Fe 430D$_2$	—	—						1414-01			
Fe 510B	—	—	E36-2	50B	AE 355P	Fe 510B	AE 355-B		Fe510-B		
Fe 510C	1.0570	St 52-3U	E36-3	50C	AE 355C	Fe 510C	AE 355-C		Fe510 C	St510C	NS12153
Fe 510D$_1$	1.0570	St 52-3N		50D	AE 355D	Fe 510D	AE 355-D		Fe510-D	St510D	NS12153
Fe 510D$_2$	—	—									
Fe510DD$_1$			E36-4				AE 355-DD		Fe510-DD		
Fe510DD$_2$	—	—									
Fe490-2	1.0050	St 50-2	A50-2		A490	Fe480	A490-2	1550-00 1550-01	Fe490-2	St490	
Fe590-2	1.0060	St 60-2	A60-2		A590	Fe580	A 590-2	1650-00 1650-01	Fe590-2	St590	
Fe 690-2	1.0070	St 70-2	A70-2		A690	Fe650	A 690-2	1855-00 1855-01	Fe690-2	St690	

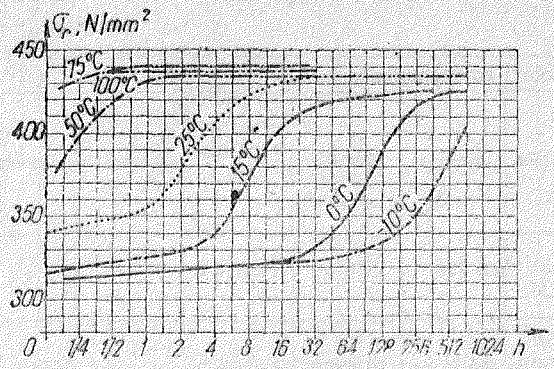


Fig. 1.31. Variația rezistențelor la rupere în timp, funcție de temperatură, la un aliaj Al—Cu—Mg

ore. Maturizarea poate fi accelerată prin ridicarea temperaturii sau întârziată prin coborârea temperaturii (fig. 1.31).

Maturizarea se manifestă prin creșterea rezistențelor mecanice și prin scăderea alungirii la rupere.

1.10.3. ALIAJE DE ALUMINIU FOLOSITE ÎN CONSTRUCȚII

Unele din aliajele de aluminiu pot fi tratate termic, iar altele nu. Tratamentul termic permite îmbunătățirea caracteristicilor mecanice.

Astfel, *călirea* constă din răcirea rapidă a soluției topite parțial sau total (temperaturi de 400 ... 550 °C — când elementele de aliere sunt dizolvate complet în aluminiu); viteza de răcire este suficient de mare ca să se producă precipitarea elementelor în timpul răcirii. Spre deosebire de oțel, aliajele de aluminiu, imediat după călire, au rezistențe mici și posedă proprietăți plastice ridicate; există o viteză critică de răcire la care se produce călirea. Răcirea se face în apă sau ulei.

După călire, elementele care se găsesc în aliaj în stare suprasaturată au tendința de a precipita, conducând astfel la o durificare prin maturizare naturală.

Dacă durificarea este activată artificial de ridicarea temperaturii, atunci ea poartă numele de *revenire*. Spre deosebire de oțeluri, la aliajele de aluminiu, prin revenirea (care de fapt este o maturizare artificială), se obține mărirea valorilor caracteristicilor mecanice (σ_r, σ_c, duritarte) și o reducere a proprietăților plastice. Revenirea se face la temperaturi între 140 și 180 °C.

Față de maturizarea naturală, revenirea duce la un spor de rezistență între 5 și 25% și la alungiri cu până la 50% mai mici.

Sunt tratabile termic, aliajele în care predomină cuprul, magneziul împreună cu siliciul și aliajele cu zinc. Aliajele în care predomină siliciul, manganul sau magneziul nu sunt tratabile termic. Sporirea rezistențelor de poate realiza prin *ecruisare*.

Pentru elementele de închidere (învelitori, pereți, plafoane și elemente de tâmplărie), la care nu sunt cerute calități de rezistență ridicate, este folosit aluminiul nealiat, deoarece este mai maleabil putând fi prelucrat mai ușor prin îndoire la rece; de asemenea mai sunt folosite aliaje de tip Al—Mn.

Pentru elementele de rezistență este necesar ca aliajul să fie sudabil; prin încălzire unele aliaje metalice își pierd caracteristicile de rezistență pe care nu le mai recapătă decât după trecerea unui anumit interval de

Tabelul 1.13

Marca aliajului (marca reper)	Principalele elemente de aliere [%]						Caracteristicile mecanice			$E \cdot 10^4$ [N/mm²]	Obs.
	Cu	Mg	Si	Mn	Cr	Zn	σ_r [N/mm²]	σ_{02} [N/mm²]	δ_5 [%]		
$AlMg_4$ (5086—H111)	—	4,0	—	0,45	0,10	—	245	125	12	7,24	Ecruisat
$AlMg_5Mn$ (5083—H111)	—	4,45	—	0,80	0,10	—	280	170	12	7,24	Ecruisat
$AlMg_5Mn$ (5456—H111)	—	5,25	—	0,80	0,10	—	295	175	12	7,24	Ecruisat
AlMgSi (6061—T_6)	0,25	1,0	0,60	—	—	—	270	250	10	7,03	Maturizat
AlMgSi (6063—T_6)	—	0,70	0,40	—	—	—	220	180	9	7,03	Maturizat
AlCuMg (2014—T_6)	4,4	0,4	0,8	0,8	—	—	420	370	7	7,60	Maturizat (nesudabil)
AlZnMg (7075—T_6)	1,6	2,5	—	—	0,3	5,6	570	515	7	7,32	Maturizat (nesudabil)

timp. În consecință, este necesar să fie folosit un aliaj la care efectul încălzirii să fie cât mai redus.

În țara noastră pentru construcții sudate se folosesc aliaje cu o sudabilitate bună și cu rezistențe mecanice corespunzătoare, care sunt afectate într-o măsură mai redusă de sudură (tab. 1.13). În această categorie intră aliajele cu magneziu în proporție relativ mare, sau aliajle de tip Al—Si—Mg cu un mic adaos de zirconiu. Rezistențele mecanice ale aliajelor de aluminiu cu magneziu sunt asemănătoare cu ale oțelului OL 37; ele nu se tratează termic. Aliajele de tipul Al—Zn—Mg cu adaos de zirconiu se pot trata termic și au rezistențe mecanice ridicate (aproape de 2 ori mai mari ca ale oțelului OL 37). Necesită, însă, unele măsuri speciale de sudare.

Se mai folosește, de asemenea, aliajul cu magneziu și siliciu (Al—Mg—Si) care: este rezistent la coroziune, are rezistență suficient de ridicată și calități bune de sudabilitate. Aliajul este utilizat la realizarea elementelor de rezistență și, pe scară largă, la elementele de tâmplărie și închideri, deoarece printr-un tratament electrochimic de suprafață denumit *anodizare* poate căpăta diferite culori și o rezistență bună la coroziune. Aliajul poate fi tratat termic. Pentru elemente cu solicitări mari poate fi folosit aliajul cu rezistențe mari (Al—Cu—Mg) denumit *duraluminiu* (acesta poate fi însă doar nituit, deoarece sudabilitatea este redusă). Aliajele de acest tip se pot trata termic. Rezistențele lor mecanice sunt de același ordin de mărime cu ale oțelului OL 37, uneori, cu puțin superioare.